

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Kralj

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Tomislav Kralj

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojem mentoru, prof. dr. sc. Damiru Doviću na prihvaćanju mentorstva te na savjetima i pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada. Također zahvaljujem Ivanu Horvatu, mag. ing. mech., na velikoj pomoći prilikom izrade rada.

Posebno zahvaljujem svojim roditeljima na velikoj potpori tijekom cijelog školovanja.

Tomislav Kralj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Kralj**

Mat. br.: 0035190309

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno-numerička analiza uštede energije za hlađenje zgrade kod primjene visokoreflektivnog premaza fasade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and numerical analysis of cooling energy need using high-reflective facade coating**

Opis zadatka:

U radu je potrebno analizirati potencijal uštede potrebne toplinske energije za hlađenje zgrade kod primjene visokoreflektivnog (VR) premaza na fasadi. Potencijalne uštede nastaju zbog manje apsorpcije Sunčeva zračenja u fasadi, no s druge strane za očekivati je povećanje potrošnje energije za grijanje.

U prvoj fazi potrebno je:

- odrediti primjenom termografije faktor emisivnosti za dugovalno zračenje uzoraka fasade s VR premazom i bez njega
- odrediti površinsku temperaturu fasade prethodna dva uzorka prilikom izlaganja Sunčevom zračenju
- izraditi model za određivanje koeficijenta apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za oba uzorka, koristeći podatke o rubnim uvjetima dobivene kroz prethodna ispitivanja.

U drugom dijelu je potrebno:

- provesti proračun potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje za odabrani model zgrade za slučaj fasade bez i sa VR premazom.

Proračune provesti pri tri različite razine potrebne godišnje toplinske energije za grijanje, i to od 10 kWh/m² i 70 kWh/m² i 150 kWh/m² stambene površine.

U proračunima koristiti javno dostupne Algoritme za proračun energetskog svojstva zgrade prema HRN EN ISO 13790.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVE PRIJENOSA TOPLINE	4
2.1. Prijenos topline provođenjem	4
2.2. Prijenos topline konvekcijom.....	5
2.3. Prijenos topline zračenjem	6
2.3.1. Planckova raspodjela intenziteta zračenja.....	8
2.3.2. Stefan-Boltzmannov zakon	10
2.3.3. Kirchhoffov zakon	10
2.3.4. Infracrveno zračenje.....	12
3. INFRACRVENA TERMOGRAFIJA	13
3.1. Termografske kamere	13
3.2. Parametri prilikom snimanja i analize termograma	14
3.3. Analiza termograma	16
4. EKSPERIMENTALNI DIO	17
4.1. Određivanje emisijskog faktora visokoreflektivnog premaza za dugovalno zračenje.....	17
4.1.1. Mjerna linija.....	17
4.1.2. Mjerna oprema	19
4.1.2.1. Termografska kamera	19
4.1.2.2. Kalibracijsko crno tijelo.....	20
4.1.2.3. Analogno – digitalni pretvarač signala	21
4.1.2.4. Termoparovi.....	22
4.1.3. Postupak mjerenja	22
4.1.4. Rezultati mjerenja i analiza.....	24
4.1.4.1. Udaljenost između reflektora i ploča 120 cm	25
4.1.4.2. Udaljenost između reflektora i ploča 70 cm	26
4.1.4.3. Udaljenost između reflektora i ploča 55 cm	27
4.1.5. Kontrolno mjerenje prilikom određivanja emisijskog faktora uz korištenje električne grijalice.....	30
4.2. Mjerenja uz izlaganje visokoreflektivnog premaza Sunčevom zračenju	32
4.2.1. Mjerna linija.....	32
4.2.2. Mjerna oprema	34
4.2.2.1. Piranometar	34
4.2.2.2. Infracrveni pirometar	35
4.2.2.3. Anemometar sa žarnom niti	36
4.2.2.4. Pomoćni anemometar s rotirajućim vrhom.....	37

4.2.3.	Postupak mjerenja	37
4.2.4.	Rezultati mjerenja i analiza.....	39
4.2.4.1.	Mjerenje s pločom premazanom VR premazom i s crnom pločom bez VR premaza.....	39
4.2.4.2.	Mjerenje s pločom premazanom VR premazom i s pločom premazanom bijelom fasadnom bojom	47
4.3.	Matematički model za određivanje faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja	53
5.	NUMERIČKI DIO.....	58
5.1.	Norma HRN EN ISO 13790	59
5.2.	Model zgrade.....	61
5.3.	Proračunski parametri	66
5.4.	Proračun godišnje potrebne toplinske energije za grijanje $Q_{H,nd}$	67
5.4.1.	Toplinska energija izmijenjena transmisijom	68
5.4.1.1.	Transmisijska izmjena topline od grijanog prostora prema okolišu	69
5.4.1.2.	Transmisijska izmjena topline prema tlu	71
5.4.2.	Toplinska energija izmijenjena ventilacijom	74
5.4.3.	Unutarnji toplinski dobici	77
5.4.4.	Solarni toplinski dobici	77
5.4.5.	Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje i trajanje sezone grijanja	80
5.4.6.	Mjesečne i godišnje vrijednosti potrebne toplinske energije za grijanje	83
5.5.	Proračun godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje $Q_{C,nd}$	84
5.5.1.	Ukupni toplinski dobici.....	85
5.5.2.	Toplina izmijenjena transmisijom i ventilacijom	85
5.5.3.	Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje i trajanje sezone hlađenja ..	85
5.5.4.	Mjesečne i godišnje vrijednosti potrebne toplinske energije za hlađenje	88
5.6.	Analiza rezultata proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje.....	89
5.6.1.	Potrebna toplinska energija za grijanje	89
5.6.2.	Potrebna toplinska energija za hlađenje.....	91
5.6.3.	Isporučena energija	93
5.6.4.	Troškovi energije	96
6.	ZAKLJUČAK.....	99
	LITERATURA.....	102
	PRILOZI.....	104

POPIS SLIKA

Slika 1.	Spektar elektromagnetskog zračenja (izvor: [7])	7
Slika 2.	Spektralna emisija crnog tijela (izvor: [7]).....	9
Slika 3.	Osjetljivost osjetnika IC zračenja u ovisnosti o valnoj duljini (izvor: [8])	15
Slika 4.	Propusnost sloja atmosfere debljine 1000 m u ovisnosti o valnoj duljini zračenja (izvor: [8])	16
Slika 5.	Shema mjerne linije u laboratoriju	18
Slika 6.	Fotografija mjerne linije u laboratoriju	18
Slika 7.	Termografska kamera „Fluke Ti25“.....	19
Slika 8.	Kalibracijsko crno tijelo „Omega BB702“	20
Slika 9.	Analogno-digitalni pretvarač signala	21
Slika 10.	Ploča premazana VR premazom (lijevo) i ploča bez VR premaza (desno)	22
Slika 11.	Prikaz izvora prividne reflektirane temperature (izvor: [8])	23
Slika 12.	Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 30 °C	24
Slika 13.	Termogram površine s visokoreflektivnim premazom (udaljenost reflektora 120 cm).....	25
Slika 14.	Termogram površine bez visokoreflektivnog premaza (udaljenost reflektora 120 cm).....	25
Slika 15.	Termogram površine s visokoreflektivnim premazom (udaljenost reflektora 70 cm).....	26
Slika 16.	Termogram površine bez visokoreflektivnog premaza (udaljenost reflektora 70 cm).....	27
Slika 17.	Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 40 °C	28
Slika 18.	Termogram površine s visokoreflektivnim premazom (udaljenost reflektora 55 cm).....	28
Slika 19.	Termogram površine bez visokoreflektivnog premaza (udaljenost reflektora 55 cm).....	29
Slika 20.	Mjerna linija s električnom grijalicom	30
Slika 21.	Pločica grijana električnom grijalicom (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje)	31
Slika 22.	Shema mjerne linije ispred laboratorija.....	33
Slika 23.	Fotografija mjerne linije ispred laboratorija.....	33
Slika 24.	Piranometar	34
Slika 25.	Infracrveni pirometar.....	35
Slika 26.	Anemometar sa žarnom niti	36
Slika 27.	Anemometar s rotirajućim vrhom	37
Slika 28.	Dijagram promjene temperature ploče s crnom površinom i ploče s VR površinom prilikom izlaganja Sunčevom zračenju	39
Slika 29.	Dijagrami: a) temperatura zraka u okolišu; b) insolacija; c) brzina vjetrova prilikom vanjskog mjerenja s pločama crne i VR površine	40
Slika 30.	Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 50 °C	45
Slika 31.	Površina premazana VR premazom i crna površina izložene Sunčevom zračenju (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje).....	45
Slika 32.	Betonski blokovi – lijevi s VR premazom, desni žute i crne boje površine (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje)	46
Slika 33.	Dijagram promjene temperature ploče bijele boje i ploče s VR premazom prilikom izlaganja Sunčevom zračenju	47

Slika 34.	Dijagrami: a) temperatura zraka u okolišu; b) insolacija; c) brzina vjetra prilikom vanjskog mjerenja s pločama bijele i VR površine	48
Slika 35.	Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 40 °C	51
Slika 36.	Površina premazana VR premazom i površina obične bijele boje izložene Sunčevom zračenju (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje)	52
Slika 37.	Termogram betonskih blokova premazanih običnom bijelom bojom (lijevo gore) i VR premazom (desno gore) izloženih Sunčevom zračenju	53
Slika 38.	Skica modela za proračun faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja...	54
Slika 39.	Potrebna toplinska energija za grijanje po mjesecima	83
Slika 40.	Potrebna toplinska energija za hlađenje po mjesecima	88
Slika 41.	Dijagram ovisnosti specifične godišnje potrebne topline za grijanje o faktoru apsorpcije za tri razine izolacije kuće u primorskoj Hrvatskoj	91
Slika 42.	Dijagram ovisnosti specifične godišnje potrebne topline za hlađenje o faktoru apsorpcije za tri razine izolacije kuće u primorskoj Hrvatskoj	92
Slika 43.	Dijagram ovisnosti specifične godišnje isporučene energije o faktoru apsorpcije za različite razine izolacije kuće: a) kontinentalna, b) primorska Hrvatska	95
Slika 44.	Dijagrami ovisnosti troškova energije o faktoru apsorpcije za različite razine izolacije kuće: a) kontinentalna Hrvatska, b) primorska Hrvatska	98

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike termografske kamere	20
Tablica 2. Karakteristike kalibracijskog crnog tijela.....	21
Tablica 3. Rezultati provedenih mjerenja radi određivanja emisijskog faktora dugovalnog zračenja visokoreflektivnog premaza	30
Tablica 4. Rezultati vanjskog mjerenja s pločama crne i visokoreflektivne površine	41
Tablica 5. Svojstva zraka (prvo vanjsko mjerenje)	42
Tablica 6. Bezdimenzijske značajke za zrak uz ploče s crnom i VR površinom	44
Tablica 7. Izračunati koeficijenti prijelaza topline uz ploče s crnom i VR površinom	44
Tablica 8. Rezultati vanjskog mjerenja s pločama obične bijele i VR površine	49
Tablica 9. Svojstva zraka (drugo vanjsko mjerenje)	50
Tablica 10. Bezdimenzijske značajke za zrak uz ploče obične bijele i VR površine.....	50
Tablica 11. Izračunati koeficijenti prijelaza topline uz ploče obične bijele i VR površine	51
Tablica 12. Ulazni podaci za proračun faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja ..	55
Tablica 13. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja uz nekorrigirani koeficijent prijelaza topline	55
Tablica 14. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za različite vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i prividne temperature neba	56
Tablica 15. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja uz korigirani koeficijent prijelaza topline $a_s = 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	57
Tablica 16. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja.....	57
Tablica 17. Površine građevnih dijelova kuće.....	61
Tablica 18. Površine građevnih dijelova koji omeđuju kondicionirani prostor kuće.....	62
Tablica 19. Građevni slojevi vanjskih zidova (svojstva materijala prema [6]).....	62
Tablica 20. Građevni slojevi poda na tlu (svojstva materijala prema [6])	62
Tablica 21. Građevni slojevi stropa (svojstva materijala prema [6])	63
Tablica 22. Termoizolacijski sloj u vanjskom zidu za promatrane modele kuće za lokaciju u kontinentalnoj Hrvatskoj (Zagreb) (svojstva materijala prema [6]).....	63
Tablica 23. Termoizolacijski sloj u podu na tlu za promatrane modele kuće za lokaciju u kontinentalnoj Hrvatskoj (Zagreb) (svojstva materijala prema [6]).....	64
Tablica 24. Termoizolacijski sloj u stropu za promatrane modele kuće za lokaciju u kontinentalnoj Hrvatskoj (Zagreb) (svojstva materijala prema [6]).....	64
Tablica 25. Termoizolacijski sloj u vanjskom zidu za promatrane modele kuće za lokaciju u primorskoj Hrvatskoj (Split) (svojstva materijala prema [6])	64
Tablica 26. Termoizolacijski sloj u podu na tlu za promatrane modele kuće za lokaciju u primorskoj Hrvatskoj (Split) (svojstva materijala prema [6])	65
Tablica 27. Termoizolacijski sloj u stropu za promatrane modele kuće za lokaciju u primorskoj Hrvatskoj (Split) (svojstva materijala prema [6])	65
Tablica 28. Referentni klimatski podaci [6]	67
Tablica 29. Toplina izmijenjena transmisijom (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina toplinske izolacije)	74
Tablica 30. Toplina izmijenjena ventilacijom (zgrada u kontinentalnoj Hrvatskoj).....	76
Tablica 31. Unutarnji toplinski dobici (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina toplinske izolacije).....	77
Tablica 32. Solarni toplinski dobici, Q_{sol} [kWh] (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina toplinske izolacije).....	80

Tablica 33. Udio broja dana koji pripadaju sezoni grijanja, $f_{h,m}$ [-] (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina toplinske izolacije)	82
Tablica 34. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina izolacije).....	84
Tablica 35. Udio broja dana koji pripadaju sezoni hlađenja, $f_{c,m}$ [-] (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina toplinske izolacije)	87
Tablica 36. Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina izolacije).....	88
Tablica 37. Povećanje specifične godišnje potrebne toplinske energije za grijanje u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska	89
Tablica 38. Povećanje specifične godišnje potrebne topline za grijanje u odnosu na kuću s istim prozorima i zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska.....	90
Tablica 39. Smanjenje specifične godišnje toplinske energije za hlađenje u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska.....	91
Tablica 40. Smanjenje specifične godišnje potrebne topline za hlađenje u odnosu na kuću s istim prozorima i zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska.....	92
Tablica 41. Specifična godišnja isporučena energija u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska	94
Tablica 42. Specifična godišnja isporučena energija u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska.....	94
Tablica 43. Godišnji troškovi energije u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska.....	96
Tablica 44. Godišnji troškovi energije u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska	96
Tablica 45. Specifična godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje uz prozore površine 5 m^2 (faktor apsorpcije $a_s = 0,4$) – primorska Hrvatska	97

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	površina
A_c	m^2	površina neprozirnog građevnog dijela
A_f	m^2	površina kondicionirane zone s vanjskim dimenzijama
A_g	m^2	površina poda
A_K	m^2	korisna površina zgrade
A_{sol}	m^2	efektivna površina građevnog dijela na koju upada Sunčevo zračenje
a	-	faktor apsorpcije
a_C, a_H, a_o	-	bezdimenzijski parametri ovisni o vremenskoj konstanti zgrade
a_s	-	faktor apsorpcije Sunčevog zračenja
B'	m	karakteristična dimenzija poda
C_m	J/K	efektivni toplinski kapacitet zgrade
c	m/s	brzina svjetlosti
$c_{p,a}$	J/(kg K)	specifični toplinski kapacitet zraka
d	-	faktor propusnosti
d	m	debljina sloja
d_m	-	broj dana u mjesecu
d_t	m	ekvivalentna debljina poda
E	W/m ²	vlastito emitirano zračenje
E_c	W/m ²	vlastito emitirano zračenje crnog tijela
E_{del}	kWh	isporučena energija
E'_{del}	kWh/m ² a	specifična godišnja isporučena energija
e_{wind}	-	faktor zaštćenosti od vjetra
F_C	-	faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja
F_F	-	udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora
$F_{r,k}$	-	faktor oblika između otvora k i neba
$F_{sh,ob}$	-	faktor zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu Sunčevog zračenja
$F_{sh,gl}$	-	faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja
F_W	-	faktor smanjenja zbog neokomitog upada Sunčevog zračenja
$f_{C,m}$	-	udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni hlađenja
$f_{H,m}$	-	udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni grijanja
$f_{H,hr}$	-	udio sati u tjednu tijekom kojih grijanje radi s normalnom postavnom vrijednošću unutarnje temperature
f_{wind}	-	faktor zaštćenosti od vjetra

f_{with}	-	udio vremena s uključenom pomičnom zaštitom
G_{sun}	W/m ²	insolacija
Gr	-	Grashofova značajka
g	m/s ²	ubrzanje zbog sile teže
g_{\perp}	-	stupanj propuštanja ukupnog zračenja okomito na ostakljenje kada pomično zasjenjenje nije uključeno
g_{gl}	-	ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente kada pomično zasjenjenje nije uključeno
$g_{\text{gl+sh}}$	-	ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente s uključenom pomičnom zaštitom
H_A	W/K	koeficijent transmisije izmjene topline prema susjednoj zgradi
H_D	W/K	koeficijent transmisije izmjene topline prema vanjskom okolišu
$H_{\text{g,m}}$	W/K	koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec
H_{pe}	W/K	vanjski periodički koeficijent transmisije izmjene topline
H_{pi}	W/K	unutarnji periodički koeficijent transmisije izmjene topline
H_{Tr}	W/K	koeficijent transmisije izmjene topline
H_U	W/K	koeficijent transmisije izmjene topline kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu
H_{Ve}	W/K	koeficijent ventilacijske izmjene topline
$H_{\text{Ve,inf}}$	W/K	koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije
$H_{\text{Ve,mech}}$	W/K	koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije
$H_{\text{Ve,win}}$	W/K	koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed otvaranja prozora
h	J s	Planckova konstanta
h_r	W/(m ² K)	vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem
$I_{\lambda,\text{c}}$	W/(m ² μm)	intenzitet vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela
K	W/m ²	svjetloća površine
k	J/K	Boltzmannova konstanta
L	m	duljina
$L_{\text{C,m}}$	-	broj dana hlađenja u mjesecu
$L_{\text{H,m}}$	-	broj dana grijanja u mjesecu
l_l	m	duljina linijskog toplinskog mosta
m'	kg/m ²	plošna masa zidova
Nu	-	Nusseltova značajka
n_{50}	h ⁻¹	broj izmjena zraka pri razlici tlaka od 50 Pa
n_{inf}	h ⁻¹	broj izmjena zraka uslijed infiltracije
n_{win}	h ⁻¹	broj izmjena zraka uslijed otvaranja prozora
P	m	izloženi opseg poda
Pr	-	Prandtlova značajka

Q	J	toplina
$Q_{C,gn}$	kWh	ukupni toplinski dobici zgrade u periodu hlađenja
$Q_{C,ht}$	kWh	ukupno izmijenjena toplinska energija u periodu hlađenja
$Q_{C,nd}$	kWh	potrebna toplinska energija za hlađenje
$Q'_{C,nd}$	kWh/m ² a	specifična godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje
$Q_{H,gn}$	kWh	ukupni toplinski dobici zgrade u periodu grijanja
$Q_{H,ht}$	kWh	ukupno izmijenjena toplinska energija u periodu grijanja
$Q_{H,nd}$	kWh	potrebna toplinska energija za grijanja
$Q'_{H,nd}$	kWh/m ² a	specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje
Q_{int}	kWh	unutarnji toplinski dobici
Q_{sol}	kWh	toplinski dobici od Sunčevog zračenja
Q_{Tr}	kWh	toplinska energija izmijenjena transmisijom
Q_{Ve}	kWh	toplinska energija izmijenjena ventilacijom
$Q_{Ve,inf}$	kWh	potrebna toplina radi infiltracije vanjskog zraka
$Q_{Ve,mech}$	kWh	potrebna toplina u sustavu mehaničke ventilacije/klimatizacije
$Q_{Ve,win}$	kWh	potrebna toplina radi otvaranja prozora (prozračivanja)
q_{spec}	W/m ²	specifični unutarnji dobitak topline
R	m ² K/W	toplinski otpor
R_{se}	m ² K/W	plošni toplinski otpor vanjske površine zida ili krova
R_{si}	m ² K/W	unutarnji plošni toplinski otpor
R_u	m ² K/W	toplinski otpor tavanskog prostora
Ra	-	Rayleighova značajka
Re	-	Reynoldsova značajka
S_s	MJ/m ²	srednja dozračena energija sunčevog zračenja
$SEER$	(Wh)/(Wh)	sezonska energetska učinkovitost
T	K	temperatura
T_{nebo}	K	prividna temperatura neba
T_{ok}	K	temperatura zraka u okolišu
t	h	proračunsko vrijeme (broj sati u mjesecu)
U	W/(m ² K)	koeficijent prolaza topline
ΔU_{TM}	W/(m ² K)	dodatak na koeficijent prolaza topline za toplinske mostove
V	m ³	neto volumen kondicioniranog dijela zgrade
V_e	m ³	bruto volumen kondicioniranog dijela zgrade
w	m/s	brzina vjetra (strujanja zraka)
y_C	-	omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline u režimu hlađenja
y_{C1}, y_{C2}	-	pomoćne vrijednosti
y_H	-	omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline u režimu grijanja
y_{H1}, y_{H2}	-	pomoćne vrijednosti

α	W/(m ² K)	koeficijent konvektivnog prijelaza topline
$\alpha_{C,red}$	-	bezdimenzijski redukcijski faktor za prekide u hlađenju
$\alpha_{H,red}$	-	bezdimenzijski redukcijski faktor za prekide u grijanju
δ	m	periodička dubina prodiranja
ε	-	emisijski faktor površine
ε_λ	-	spektralni emisijski faktor
$\varepsilon_{\lambda,\varphi}$	-	spektralni emisijski faktor u smjeru kuta φ u odnosu na normalu površine
$\eta_{H,gn}$	-	faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje
$\eta_{C,ls}$	-	faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje
ϑ	°C	temperatura
ϑ_e	°C	temperatura vanjskog zraka
$\vartheta_{e,m}$	°C	prosječna mjesečna temperatura vanjskog zraka
$\bar{\vartheta}_e$	°C	srednja godišnja temperatura vanjskog zraka
$\Delta\vartheta_{er}$	°C	prosječna temperaturna razlika vanjske temperature zraka i temperature neba
$\bar{\vartheta}_{int}$	°C	srednja godišnja postavna temperatura
$\vartheta_{int;C}$	°C	unutarnja postavna temperatura hlađene zone
$\vartheta_{int;H}$	°C	unutarnja postavna temperatura grijane zone
ϑ_{nebo}	°C	prividna temperatura neba
ϑ_{ok}	°C	temperatura zraka u okolišu
ϑ_∞	°C	temperatura fluida podalje od stijenke
λ	W/(m K)	toplinska provodnost
λ	m	valna duljina
λ_m	m	valna duljina maksimalnog intenziteta zračenja
μ	Pa s	dinamička viskoznost
ν	s ⁻¹	frekvencija vala
ν	m ² /s	kinematička viskoznost
ρ	kg/m ³	gustoća
σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmannova konstanta
τ	h	vremenska konstanta zgrade
$\tau_{C,o}$	h	referentna vremenska konstanta za hlađenje
$\tau_{H,o}$	h	referentna vremenska konstanta za grijanje
Φ	W	toplinski tok
Φ_m	W	toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec
$\Phi_{r,k}$	W	toplinski tok zračenjem prema nebu
χ_j	W/K	koeficijent prolaza topline točkastog toplinskog mosta
ψ_l	W/(m K)	duljinski koeficijent prolaza topline linijskog toplinskog mosta

SAŽETAK

U ovom radu analiziran je potencijal uštede potrebne toplinske energije za hlađenje zgrade kod primjene visokoreflektivnog premaza za fasade. U eksperimentalnom dijelu, primjenom infracrvene termografije određen je emisijski faktor dugovalnog zračenja visokoreflektivnog premaza za fasade. Metalne ploče sa i bez visokoreflektivnog premaza izložene su Sunčevom zračenju te su istovremeno izmjerene njihove temperature i bitni meteorološki parametri. Rezultati mjerenja iskorišteni su u matematičkom modelu za određivanje faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja svih ispitivanih površina ploča. U numeričkom dijelu proveden je proračun godišnje potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje, prema normi HRN EN ISO 13790, za odabrani model zgrade sa i bez visokoreflektivnog premaza. Proračun je proveden za tri različite razine specifične potrebne toplinske energije za grijanje ($10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, $70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ i $150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) koje su postignute s faktorom apsorpcije fasade 0,4. Također su određene vrijednosti ukupne isporučene energije i troškova energije. Na kraju je prikazana analiza utjecaja faktora apsorpcije Sunčevog zračenja na troškove energije, isporučenu energiju i godišnju potrebnu toplinsku energiju za grijanje i hlađenje.

Ključne riječi: visokoreflektivni premaz; fasada; termografija; hlađenje zgrada; faktor apsorpcije Sunčevog zračenja

SUMMARY

In this thesis, the potential for savings in net cooling energy need by using a high-reflective facade coating is analysed. In the experimental part, longwave emissivity of the high-reflective facade coating is determined by means of infrared thermography. Metal plates with and without high-reflective coating are exposed to solar radiation and their temperatures and relevant weather parameters are simultaneously measured. Measurement results are used in a mathematical model for calculation of solar absorptance of all observed plate surfaces. In the numerical part, the calculations of annual net heating and cooling energy need are done according to the HRN EN ISO 13790 standard, for a model of a building with and without high-reflective facade coating. The calculations are done for three different values of annual heating energy need ($10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, $70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ and $150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$), which are achieved with solar absorptance of the facade equal to 0,4. Values of total purchased energy and costs of energy are also determined. Finally, the analysis of influence of solar absorptance of the facade on the costs of energy, total purchased energy and annual net heating and cooling energy is shown.

Key words: high-reflective coating; facade; thermography; building cooling; solar absorptance

1. UVOD

U Republici Hrvatskoj zgrade su najveći potrošači energije, s udjelom od približno 40 % u neposrednoj potrošnji energije. [1] Samim time, zgradarstvo ima najveći potencijal za ostvarenje ušteda u potrošnji energije. Kako bi se uštede ostvarile, potrebno je osigurati visoku energetska učinkovitost zgrada, odnosno osigurati minimalnu potrošnju energije uz postizanje optimalne ugodnosti boravka i korištenja zgrade. Osim ušteda u potrošnji energije, povećanje energetske učinkovitosti doprinosi i zaštiti okoliša te standardu života u zgradama. Mjere povećanja energetske učinkovitosti također potiču ulaganja u građevinski sektor, intenziviraju razvoj gospodarstva i povećavaju mogućnosti zapošljavanja stanovništva.

Prilikom procesa pristupanja Republike Hrvatske Europskoj uniji, u hrvatsko zakonodavstvo usvojene su brojne europske direktive iz područja zgradarstva i energetske učinkovitosti. Jedna od najvažnijih zasigurno je Direktiva o energetske učinkovitosti 2002/91/EC, poznata pod kraticom EPBD (*The Energy Performance of Buildings Directive*). Direktiva je doradana 2010. godine te je objavljena nova EPBD direktiva 2010/31/EU, koja je proizašla iz europskih inicijativa za poticanje korištenja energije iz obnovljivih izvora. Njihova su osnova ciljevi Europske unije za razdoblje do 2020. godine, koji se odnose na smanjenje emisije stakleničkih plinova za 20 %, povećanje energetske učinkovitosti za 20 % te povećanje udjela obnovljivih izvora energije za 20 %. [2] Kako bi se postigli postavljeni ciljevi, u Republici Hrvatskoj doneseni su brojni podzakonski akti utemeljeni na Zakonu o prostornom uređenju i gradnji. Neki od tih akata su Tehnički propis o sustavima grijanja i hlađenja zgrada, Pravilnik o energetske certificiranju zgrada, Pravilnik o uvjetima i mjerilima za osobe koje provode energetske preglede i energetske certificiranje zgrada i brojni drugi.

Većina zgrada u Republici Hrvatskoj izgrađena je prije 1987. godine te one nemaju dovoljno kvalitetnu toplinsku zaštitu. [3] Većina takvih zgrada ima velike gubitke topline, uz prosječnu godišnju potrošnju energije za grijanje između 150 i 200 kWh/m²a što ih svrstava u energetske razred E. [1] U proteklih su nekoliko godina u Republici Hrvatskoj u svrhu postizanja ušteda u potrošnji energije započeti programi energetske obnove zgrada različitih namjena uz izdavanje energetskih certifikata koji pokazuju energetske stanje zgrade ili nekog njenog dijela. Temelj za uspostavljanje ovih programa dva su prethodno navedena pravilnika, [4] i [5]. Pomoću njih uvedena je metodologija energetskih pregleda zgrada te je započeta obuka osoba za provedbu energetskih pregleda i certificiranja zgrada. Mjere povećanja energetske učinkovitosti zgrada u

sklopu programa energetske obnove sufinancirane su iz državne blagajne, a njihov je cilj smanjenje ukupne potrošnje energije na državnoj razini, uz smanjenje emisija ugljikovog dioksida.

Mjere povećanja energetske učinkovitosti uključuju [3]:

- energetski pregled zgrade uz izdavanje energetskog certifikata za cijelu zgradu ili jedan njen dio
- ugradnju toplinske izolacije i energetski učinkovite stolarije radi povećanja toplinske zaštite zgrade
- povećanje učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja, ventilacije, rasvjete i električnih uređaja
- korištenje obnovljivih izvora energije

U proteklih nekoliko godina zabilježen je značajan porast uporabe klimatizacijskih i rashladnih sustava u zgradama. To dovodi do povećanja vršnih opterećenja električne mreže uz porast ukupne potrošnje električne energije. Stoga se u europskim direktivama daje poseban naglasak na unaprijeđenje energetske učinkovitosti zgrada tijekom ljetnog razdoblja te se teži daljnjem razvoju tehnika pasivnog hlađenja zgrada. [2]

U svrhu poboljšanja tehnika za postizanje povećanja energetske učinkovitosti zgrada, provode se brojna istraživanja i razvijaju novi inovativni načini za smanjenje potrošnje energije u zgradarstvu. Jedan od relativno novih pristupa pokušaju poboljšanja energetske svojstava zgrade uporaba je visokoreflektivnih (VR) premaza za površinu vanjske ovojnice zgrade, odnosno korištenje fasadnih boja niskog faktora apsorpcije Sunčevog zračenja. Niži faktor apsorpcije značio bi veću reflektivnost Sunčevog zračenja na površini fasade, čime bi se smanjili solarni toplinski dobici zgrade. U idealnom bi slučaju solarni toplinski dobici uz korištenje visokoreflektivnih premaza bili znatno manji nego uz korištenje običnih komercijalno dostupnih fasadnih boja te bi se postiglo značajno smanjenje potrebne toplinske energije za hlađenje zgrade. Međutim, u slučaju korištenja premaza s vrlo niskim faktorom apsorpcije Sunčevog zračenja može se očekivati kontraefekt u potrošnji toplinske energije za grijanje. Naime, vrlo nizak faktor apsorpcije Sunčevog zračenja smanjuje solarne toplinske dobice i zimi, kada su oni poželjni zbog toga što doprinose zagrijavanju prostora unutar zgrade. Stoga je potrebno provesti istraživanja pomoću kojih bi se donijeli određeni zaključci o mogućnostima i isplativosti primjene visokoreflektivnih premaza za fasade te o doprinosu takvih premaza povećanju sveukupne energetske učinkovitosti zgrada na kojima se koriste.

U ovom je diplomskom radu napravljena eksperimentalno-numerička analiza potencijala uštede energije za hlađenje zgrade prilikom primjene visokoreflektivnog premaza za fasade. Napravljeno je laboratorijsko ispitivanje “visokoreflektivnog” premaza nepoznatih karakteristika, u svrhu određivanja faktora apsorpcije za Sunčevo zračenje fasade premazane tim premazom. Najprije je primjenom termografije laboratorijskim mjerenjima utvrđen emisijski faktor dugovalnog zračenja ploče premazane ispitivanim premazom. Nakon toga su napravljena mjerenja radi utvrđivanja površinskih temperatura prilikom izlaganja premazanih ploča Sunčevom zračenju. Cilj provedenih mjerenja bio je prikupljanje podataka o površinskim temperaturama uzoraka premazanih nepoznatim premazom i uzoraka bez navedenog premaza te prikupljanje podataka o stanju okoliša (brzini vjetra, temperaturi okoliša i intenzitetu Sunčevog zračenja) u kojem su mjerenja provedena. Pomoću jednostavnog matematičkog modela temeljenog na zakonu očuvanja energije i analizom prikupljenih podataka utvrđeni su faktori apsorpcije svih ispitivanih uzoraka. Kako bi se odredio utjecaj faktora apsorpcije fasadnih premaza na iznos godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje te na ukupnu potrošnju energije, napravljen je proračun temeljen na Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 [6]. Proračun je proveden za nekoliko modela obiteljske kuće, različitih razina toplinske izolacije.

2. OSNOVE PRIJENOSA TOPLINE

Prema drugom zakonu termodinamike, toplina ne može sama od sebe prijeći s tijela niže temperature na tijelo više temperature. Toplina se prenosi s tijela više temperature na tijelo niže temperature na tri osnovna načina:

- provođenjem (kondukcijom)
- konvekcijom
- zračenjem (radijacijom)

Za provođenje i konvekciju nužno je postojanje neke tvari kao posrednika za prijenos topline, dok se zračenjem toplina prenosi i bez materijalnog posrednika, s obzirom da je zračenje pojava elektromagnetske prirode te se toplina prenosi elektromagnetskim valovima. Prema tome, zračenje je jedini način prijenosa topline kroz vakuum.

2.1. Prijenos topline provođenjem

Provođenje topline (kondukcija) događa se uz postojanje temperaturnog gradijenta između dvaju dijelova neke krutine. Prijenos kinetičke energije s jedne molekule na drugu temelj je ovog načina prijenosa topline. Molekule više temperature imaju veću prosječnu brzinu titranja te se usporavaju prilikom dodira s drugim molekulama manje prosječne brzine, a sporije molekule se pritom ubrzavaju. Prema tome, prilikom dodira dviju molekula različitih temperatura, molekula više temperature će se ohladiti, dok će se molekula niže temperature zagrijati na višu temperaturu.

Kondukcija se javlja i u prijenosu topline kroz tekućine, u slučaju kad one miruju ili kad se gibaju bez miješanja čestica po strujnicama, na primjer pri laminarnom strujanju tekućine.

Prijenos topline kondukcijom može se opisati Fourierovim stavkom.

$$\delta^2 Q = -\lambda \frac{\delta \vartheta}{\delta n} dA dt \quad (1)$$

Izraz (1) govori da je diferencijalni iznos topline koji u smjeru normale n prođe kroz diferencijalni element površine dA u vremenu dt proporcionalan temperaturnom gradijentu $\delta \vartheta / \delta n$. Oznaka λ u prethodnoj jednadžbi označava toplinsku provodnost, koja je fizikalno svojstvo tvari. Količina topline koja u vremenu dt prođe kroz izotermnu plohu površine dA

naziva se gustoćom toplinskog toka. Ona je vektor okomit na izotermnu plohu te ima pozitivan predznak u smjeru temperaturnog pada. Izražava se jednadžbom (2).

$$\vec{q} = \frac{\delta q}{\delta t \delta A} = -\lambda \text{ grad } \vartheta \quad (2)$$

Skalarna vrijednost gustoće toplinskog toka izražava se jednadžbom (3), koja je poznata kao Fourierov zakon, koji govori da je gustoća toplinskog toka izravno proporcionalna temperaturnom gradijentu.

$$q = -\lambda \frac{\delta \vartheta}{\delta n} \quad (3)$$

Ako se gustoća toplinskog toka integrira po cijeloj izotermnoj plohi, dobiva se iznos toplinskog toka kroz izotermnu plohu. Integracijom toplinskog toka po vremenu dobiva se iznos ukupno izmijenjene topline kroz izotermnu plohu u promatranom vremenskom intervalu. Izraz za sveukupno izmijenjenu toplinu glasi:

$$Q = - \int_0^t dt \int_A \lambda \frac{\delta \vartheta}{\delta n} dA \quad (4)$$

2.2. Prijenos topline konvekcijom

Prijenos topline konvekcijom javlja se prilikom komešanja čestica tekućine različitih temperatura. Čestice različitih temperatura zbog komešanja dolaze u međusobni kontakt i pritom međusobno izmjenjuju toplinu. Prema tome, konvektivni način prijenosa topline usko je vezan uz pojave strujanja tekućine.

Dvije su osnovne vrste prijenosa topline konvekcijom. U slučaju da se strujanje tekućine javlja isključivo zbog razlike u gustoći čestica, prijenos topline odvija se slobodnom konvekcijom. Zagrijane čestice tekućine imaju manju gustoću te se kreću uvis pa dolazi do strujanja tekućine. i komešanja čestica tekućine zbog kojeg dolazi do međusobnih sudara čestica i posljedičnog prijenosa topline. Ako tekućina struji zbog nametnute razlike tlakova (pumpa, vjetar, ventilator...), radi se o prisilnoj konvekciji.

Obje vrste konvekcije mogu postojati istovremeno. Što je bolja izmiješanost tekućine, javlja se veći broj dodira između čestica različitih temperatura, a time prijenos topline konvekcijom postaje intenzivniji. Dvije su vrste strujanja tekućine, laminarno strujanje i turbulentno strujanje. Prilikom laminarnog strujanja čestice tekućine u jednoj strujnici ne miješaju se s

česticama tekućine u drugim strujnicama pa se toplina između laminarnih slojeva poprečno prenosi provođenjem, kao kod mirujućih tekućina. Kod turbulentnog strujanja javlja se i poprečno gibanje čestica. Miješanje čestica intenzivnije je što je turbulencija izraženija pa je i prijenos topline intenzivniji u slučajevima s izraženom turbulencijom.

Izrazom (5), nazvanim Newtonov zakon hlađenja, određuje se vrijednost toplinskog toka koji se prenese konvekcijom s elementa vanjske krute površine dA temperature ϑ_s na okolišnu tekućinu temperature ϑ_∞ .

$$\delta\Phi = \alpha (\vartheta_s - \vartheta_\infty) dA \quad (5)$$

U prethodnoj jednadžbi oznakom α označen je lokalni koeficijent prijelaza topline, poznat i pod nazivom koeficijent konvektivnog prijelaza topline. Njime se izražavaju uvjeti u kojima se odvija prijenos topline, a ovisi o načinu strujanja tekućine, njenoj temperaturi i fizikalnim svojstvima, geometriji tijela i mnogim drugim faktorima.

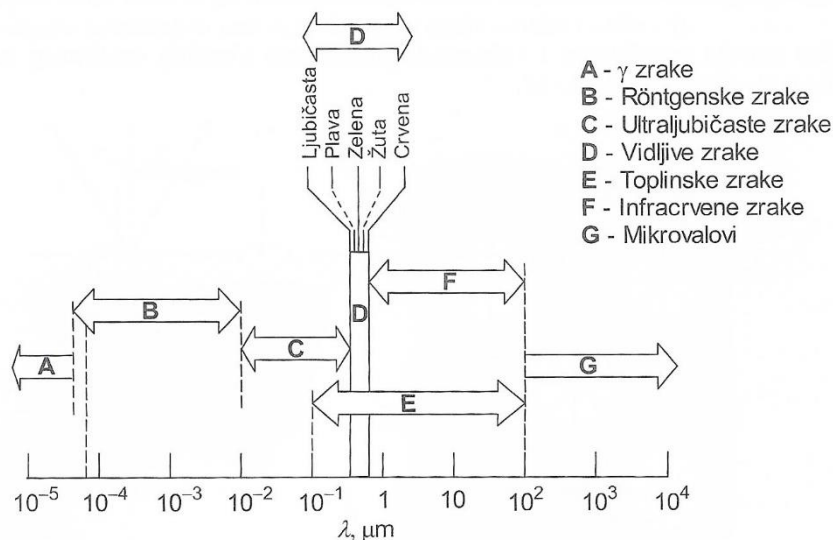
2.3. Prijenos topline zračenjem

Svako tijelo čija je temperatura veća od apsolutne nule emitira elektromagnetske valove. Energija koju tijelo prima i predaje može se promatrati kao kontinuirani spektar elektromagnetskih valova, s obzirom da se izmjena energije odvija u vrlo malim, nedjeljivim iznosima energije, koji se zovu fotoni ili kvanti. Elektromagnetski valovi su dvojne prirode: valne – po Maxwelllovoj teoriji te čestične – po Planckovoj teoriji. Svaki elektromagnetski val može se opisati brzinom c , valnom duljinom λ i frekvencijom ν , koji zadovoljavaju sljedeću jednadžbu:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (6)$$

Frekvencija vala neovisna je, a brzina širenja i valna duljina ovisne su o vrsti tvari kroz koju se val širi. Brzina širenja vala u vakuumu iznosi $2,998 \cdot 10^8$ m/s, a ta se brzina može smatrati konstantnom za sve probleme obrađene u ovom diplomskom radu.

Zračenjem se energija prenosi na svim valnim duljinama, tj. $0 \leq \lambda \leq +\infty$. Odzračena energija nije jednoliko raspodijeljena po svim valnim duljinama, već postoji valna duljina na kojoj je intenzitet zračenja tijela neke temperature T maksimalan. Spektar elektromagnetskog zračenja može se podijeliti na više područja, prema valnoj duljini.



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja (izvor: [7])

Energija fotona zračenja proporcionalna je frekvenciji zračenja, a obrnuto proporcionalna valnoj duljini, dakle, veću energiju imaju fotoni većih frekvencija. Za proučavanje prijenosa topline najzanimljivija su područja infracrvenog i vidljivog, a djelomično i ultraljubičastog zračenja, tj. zračenje valnih duljina od 0,1 do 100 μm . Vidljivi dio elektromagnetskog spektra proteže se od otprilike 0,4 do 0,7 μm . Ostali dijelovi spektra nisu vidljivi za ljudsko oko.

Zračenje koje dolazi s površine nekog tijela sastoji se od:

- vlastitog emitiranog zračenja
- reflektiranog zračenja
- propuštenog zračenja

Ukupno zračenje površine tijela naziva se svjetloća površine i označava se oznakom K , uz mjernu jedinicu W/m^2 . Zračenje krutina i kapljevina površinski je fenomen, s obzirom da se zračenje molekula iz unutrašnjosti tvari apsorbira u susjednim molekulama. Prema tome, zračenje s površine nekog tijela ovisi o svojstvima te površine, a ta svojstva nisu nužno jednaka za sve valne duljine zračenja.

Tijelo kojem se dozračuje energija može:

- apsorbirati dozračenu energiju kroz svoju površinu
- reflektirati zračenje od svoje površine
- propustiti zračenje

Matematički se ta činjenica može prikazati sljedećim izrazom:

$$a + r + d = 1 \quad (7)$$

U ovoj jednadžbi a je faktor apsorpcije, r je faktor refleksije, dok je d faktor propusnosti. Ti faktori pokazuju koliki udio dospjelog zračenja se apsorbira, reflektira ili propušta. Većina tijela u inženjerskoj primjeni nepropusna je za zračenje, odnosno imaju faktor propusnosti d jednak nuli. Tijelo za koje vrijedi $a = 1$ naziva se crno tijelo. Takvo bi tijelo svu dozračenu energiju apsorbiralo. Suprotno crnom tijelu, za bijelo tijelo vrijedi $r = 1$ te bi takvo tijelo svu dozračenu energiju reflektiralo.

Svojstva crnog tijela su:

- potpuna apsorpcija zračenja svih valnih duljina i svih smjerova
- intenzitet zračenja neovisan o pravcu
- pri nekoj određenoj valnoj duljini i temperaturi nijedna druga površina ne može emitirati više zračenja od površine crnog tijela

2.3.1. Planckova raspodjela intenziteta zračenja

Intenzitet vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela, $I_{\lambda,c}$, određuje se Planckovom jednadžbom:

$$I_{\lambda,c} = \frac{2 h c_0^2}{\lambda^5 \left[\exp \left(\frac{h c_0}{\lambda k T} \right) - 1 \right]} \quad (8)$$

U ovoj jednadžbi h predstavlja Planckovu konstantu, k predstavlja Boltzmannovu konstantu, a c_0 brzinu svjetlosti u vakuumu. Iz izraza je vidljivo da intenzitet vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela ovisi o temperaturi crnog tijela i valnoj duljini zračenja. Iznosi spomenutih konstanti su:

$$h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

S obzirom da je zračenje crnog tijela neovisno o pravcu, izraz za intenzitet zračenja u čitavi poluprostoru dobiva se integracijom izraza za intenzitet vlastitog emitiranog zračenja po cijelom poluprostoru te glasi:

$$E_{\lambda,c} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (9)$$

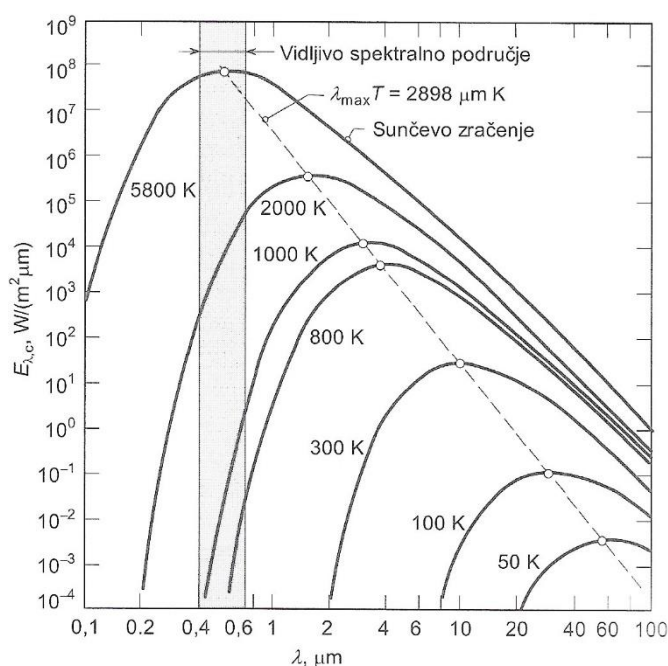
Oznaka C_1 predstavlja prvu, a oznaka C_2 drugu konstantu zračenja. Njihovi su iznosi:

$$C_1 = 2 \pi h c_0^2 = 3,742 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = h c_0 / k = 1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m K}$$

Izraz za vlastito emitirano zračenje crnog tijela poznat je pod nazivom Planckova raspodjela.

Ona je prikazana na sljedećoj slici za nekoliko odabranih temperatura.



Slika 2. Spektralna emisija crnog tijela (izvor: [7])

Na slici je vidljivo da vlastito emitirano zračenje crnog tijela raste s porastom njegove temperature. Također, vidljivo je da se s porastom temperature tijela najintenzivnije zračenje pomiče u područje kraćih valnih duljina. Derivacijom izraza za vlastito emitirano zračenje uz izjednačavanje s nulom, pronalazi se ekstrem funkcije. Na taj je način moguće odrediti valnu duljinu za koju je zračenje tijela na nekoj odabranoj temperaturi maksimalno. Izraz kojim se ta valna duljina određuje naziva se Wienov zakon pomaka i glasi:

$$\lambda_m = \frac{C_3}{T} \quad (10)$$

C_3 u prethodnoj jednadžbi predstavlja treću konstantu zračenja i iznosi 2897,8 $\mu\text{m K}$.

2.3.2. Stefan-Boltzmannov zakon

Ako se Planckova raspodjela integrira po svim valnim duljinama, dobiva se iznos vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela, a dobiveni izraz glasi:

$$E_c = \sigma T^4 \quad (11)$$

U prethodnoj jednadžbi σ predstavlja Stefan – Boltzmannovu konstantu i iznosi $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4\text{)}$. Površine realnih tijela nemaju jednaka svojstva kao površina idealiziranog crnog tijela. S obzirom da nijedno tijelo ne može emitirati više zračenja od crnog tijela iste temperature, uvodi se emisijski faktor površine realnog tijela ε . Vlastito emitirano zračenje realnog tijela se stoga može izraziti sljedećim izrazom:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

Emisijski faktor površine realnog tijela definiran je kao omjer vlastitog emitiranog zračenja površine realnog (ne crnog) tijela i vlastitog emitiranog zračenja površine crnog tijela iste temperature, odnosno:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_c(T)} \quad (13)$$

Emisijski faktor ovisi o valnoj duljini zračenja te o kutu između pravca nekog odabranog smjera i normale promatrane površine, a intenzitet zračenja crnog tijela neovisan je o pravcu, odnosno, crno tijelo je idealni difuzni emiter zračenja.

Nemetalne površine imaju emisijski faktor približno konstantan za kuteve s normalom $\varphi \leq 70^\circ$, a za veće se kuteve emisijski faktor naglo smanjuje. Metalne površine imaju približno konstantan emisijski faktor za kuteve $\varphi \leq 40^\circ$, za veće kuteve se povećava i zatim naglo pada na nulu za kut $\varphi = 90^\circ$. S obzirom da promjene emisijskog faktora u ovisnosti o kutu nisu prevelike, obično se u proračunima uzima iznos emisijskog faktora površine jednak onome u smjeru normale.

2.3.3. Kirchhoffov zakon

Faktor apsorpcije a i emisijski faktor ε ovise o valnoj duljini toplinske zrake koja upada na površinu tijela te o svojstvima i stanju površine tijela. U slučaju da se postave dvije stijenke jednakih temperatura u izolirani sustav, od kojih jedna stijenka ima faktor $a = 1$ (površina crnog tijela), dok druga ima $a < 1$, između stijenki će se pojaviti zračenje energije bez izmjene

toplinskog toka. Svjetloća površine crnog tijela sastoji se samo od vlastitog emitiranog zračenja E_c , dok se svjetloća druge, realne stijenke sastoji od vlastitog emitiranog zračenja E i reflektiranog zračenja $(1-a) \cdot E_c$.

Stijenka crnog tijela apsorbira svu svjetloću koja dolazi sa stijenke realne površine, a realna površina apsorbira samo dio svjetloće crne stijenke, $a \cdot E_c$. I jedna i druga površina moraju apsorbirati jednaku količinu zračenja koliku i emitiraju, kako bi toplinska ravnoteža dviju stijenki jednakih temperatura bila zadovoljena. Može se postaviti jednadžba kojom se ta tvrdnja opisuje na primjeru stijenke crnog tijela:

$$E_c(T) = E(T) + (1 - a) E_c(T) \quad (14)$$

Jednostavnim sređivanjem jednadžbe dobiva se izraz za faktor apsorpcije:

$$a = \frac{E(T)}{E_c(T)} \quad (15)$$

Dakle, površina tijela u stacionarnom stanju, odnosno u toplinskoj ravnoteži, ima emisijski faktor jednak faktoru apsorpcije, što predstavlja Kirchhoffov zakon.

$$a = \varepsilon \quad (16)$$

Može se zaključiti da su materijali koji su dobri apsorberi zračenja ujedno i dobri emiteri zračenja.

U prethodno spomenutom modelu izvoda Kirchhoffovog zakona upadno zračenje na površinu realnog tijela dolazi s površine crnog tijela. S obzirom da crno tijelo ima jednak intenzitet zračenja u svim smjerovima neovisno o kutu prema normali površine te da crno tijelo ima emisijski faktor $\varepsilon = 1$ neovisno o valnoj duljini, Kirchhoffov stavak može se pisati u obliku koji vrijedi i za tijelo bez tih ograničenja:

$$a_{\lambda,\varphi} = \varepsilon_{\lambda,\varphi} \quad (17)$$

Spektralne vrijednosti $a_{\lambda,\varphi}$ i $\varepsilon_{\lambda,\varphi}$ površine nekog realnog tijela jednake su ako je zadovoljen barem jedan od dvaju uvjeta:

- difuznost površine realnog tijela
- difuznost spektralnog intenziteta upadnog zračenja I_λ

Već je prije spomenuto da se kod većine metalnih i nemetalnih površina emisijski faktor ne mijenja znatno za kuteve manje od 40° (metalne površine), odnosno 70° (nemetalne površine). Za takve površine može se pisati:

$$a_\lambda = \varepsilon_\lambda \quad (18)$$

Za takozvane sive površine vrijedi da su im a_λ i ε_λ neovisni o valnoj duljini zračenja, dok za obojene površine vrijedi:

$$a_\lambda = \varepsilon_\lambda = f(\lambda) \quad (19)$$

U slučaju postojanja dvaju ili više tijela različitih temperatura, između njih će dolaziti do izmjene toplinskog toka zračenjem. Zračenje emitiraju i tijelo niže i tijelo više temperature, a toplinski tok odgovara razlici apsorbiranih zračenja dvaju tijela te ima smjer s toplijeg prema hladnijem tijelu.

2.3.4. Infracrveno zračenje

Infracrveno zračenje nalazi se na spektru odmah do vidljivog zračenja, u području nešto većih valnih duljina. Zračenje proučavano infracrvenom termografijom može se podijeliti na dva dijela:

- SW – kratkovalno infracrveno zračenje (valna duljina 3 do 5 μm)
- LW – dugovalno infracrveno zračenje (valna duljina 8 do 14 μm)

Zračenje krutina i kapljevina smatra se površinskim fenomenom. Zračenje plinova volumenski je fenomen. Troatomni i višeatomni plinovi apsorbiraju i emitiraju zračenje samo u nekim područjima spektra, dok su za zračenja ostalih valnih duljina potpuno propusni. Tako je propusnost atmosfere za zračenje valne duljine između 5 i 8 μm vrlo slaba, što otežava mjerenje termografskim kamerama, pošto kamera za rad u tom području ne može detektirati zračenje sa željenog objekta. U tom području kamera bi detektirala vlastito emitirano zračenje plina (zraka) između kamere i objekta mjerenja.

3. INFRACRVENA TERMOGRAFIJA

Infracrvena termografija je nerazorna, beskontaktna metoda mjerenja temperature na površini nekog tijela. Njena je osnova mjerenje intenziteta infracrvenog zračenja koje dolazi s površine promatranog tijela. Uređaj kojim se mjerenje obavlja naziva se termografska kamera, u kojoj se stvara slika infracrvenog zračenja promatranog područja, odnosno termogram. U današnje vrijeme dostupni su i brojni računalni programi za detaljnu analizu i obradu izrađenih termograma.

3.1. Termografske kamere

Razvoj termografskih kamera počeo je šezdesetih godina prošlog stoljeća. Komercijalnu primjenu termografije omogućilo je uvođenje uređaja za skeniranje vidnog polja kamere. Time je ostvarena mogućnost dobivanja termograma mirujućom kamerom. Prve kamere imale su jedino mogućnost linijskog skeniranja, što je značilo da je za dobivanje dvodimenzijske slike bilo potrebno kameru pomicati uzduž promatranog tijela. Stoga su razvijene termografske kamere sa sinkroniziranim oscilirajućim ogledalima. Zbog tromosti ogledala, kod takvih uređaja bilo je potrebno više minuta za stvaranje slike. To je onemogućavalo praćenje dinamičkih pojava, odnosno praćenje pokretnih objekata ili promjena temperature na mirujućem objektu tijekom vremena.

Kasnije su razvijene kamere s brzorotirajućim osmerostranim prizmama, koje su omogućile skeniranje vidnog polja do 16 puta u sekundi. Takve mehaničke kamere zahtijevale su hlađenje svojih osjetnika tekućim dušikom. Iz tog su razloga kamere bile glomazne i manje pokretljive, što je otežavalo mjerenje. Hlađenje osjetnika provodilo se pošto su odzivne karakteristike materijala osjetnika bile najbolje na niskim temperaturama, tj. na njima je izlazni signal osjetnika bio najjači. Drugi razlog bio je uklanjanje šuma. Naime, osjetnik je osim zračenja promatranog objekta bio izložen i zračenju okolnih dijelova termografske kamere. Držanjem tih dijelova na niskoj temperaturi smanjivao se intenzitet njihovog zračenja koje izaziva smetnje u mjerenju.

Osjetnici infracrvenog zračenja fotonski su detektori i uglavnom se izrađuju od poluvodičkih materijala, koji pod utjecajem infracrvenog zračenja daju naponski odziv. Najčešći su materijali indijev antimonid (InSb) i živin kadmij telurid (HgCdTe). Također, koriste se i bolometri koji

s promjenom temperature mijenjaju toplinski otpor te piroelektrični osjetnici, koji mijenjaju polarizaciju pod utjecajem IC zračenja. Promjena polarizacije očitava se kao razlika napona.

Današnje termografske kamere ne koriste prizme ni ogledala za skeniranje slike, već se koriste FPA (*Focal Plane Array*) detektori. Na mikročip pravokutnog oblika nanosena je matrica pojedinačnih detektora infracrvenog zračenja. Optički sustav usmjerava upadno zračenje na fokusnu ravninu kamere te FPA detektor može snimati cijelo vidno polje odjednom, bez korištenja posebnog sustava za skeniranje. FPA detektori donijeli su značajan napredak u izradi termografskih kamera:

- povećana je brzina obnove slike – oko 30 Hz
- veća razlučivost slike
- manje dimenzije kamere – olakšano nošenje kamere i rad na terenu
- nema potrebe za hlađenjem tekućim dušikom – dovoljni su i jednostavni Peltierovi članci za održavanje radne temperature

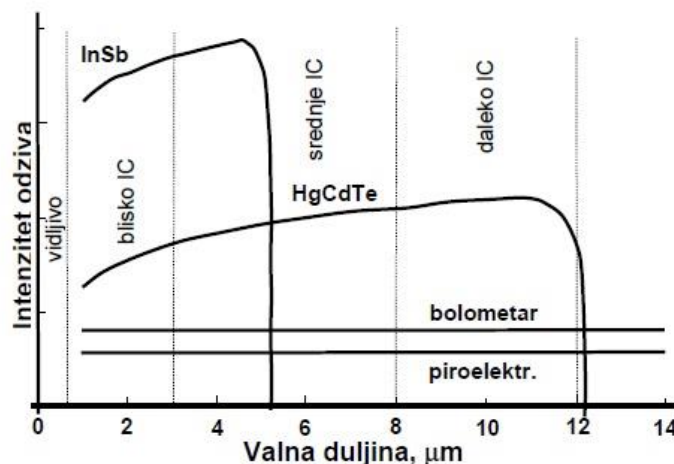
3.2. Parametri prilikom snimanja i analize termograma

Termogram je slika raspodjele infracrvenog zračenja koje dolazi s površine promatranog tijela. Pomoću takve slike moguće je određivati temperaturu svih točaka na površini tijela. Točnost određivanja temperature ovisi o parametrima termografske kamere, svojstvima promatranog objekta i okoline tijekom mjerenja.

Glavni parametri termografske kamere su:

- područje mjerenja temperature
- razlučivost temperaturnih razlika
- prostorna razlučivost
- brzina obnove slike
- točnost

Područje mjerenja temperature uglavnom ovisi o vrsti osjetnika koji je ugrađen u kameru. Kamere namijenjene za područje niskih temperatura koriste osjetnike koji su osjetljivi na infracrveno zračenje većih valnih duljina, a kamere za više temperature koriste osjetnike osjetljivije na IC zračenje kraćih valnih duljina. Najčešće se koriste kamere s osjetnikom za dugovalno IC zračenje, izrađenim od HgCdTe, koji ima relativno široko područje osjetljivosti, od -50 °C do 500 °C.



Slika 3. Osjetljivost osjetnika IC zračenja u ovisnosti o valnoj duljini (izvor: [8])

Razlučivost temperaturnih razlika govori kolika je minimalna razlika temperatura koju termografska kamera može registrirati. Ovisi o sposobnosti da se uklone smetnje prilikom snimanja termograma, čiji je izvor ponajviše u samoj kameri. Današnje termografske kamere obično imaju razlučivost otprilike $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, a neki posebni i skuplji modeli i oko $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Prostorna razlučivost govori o veličini najmanjeg objekta kojeg se može jasno vidjeti na termogramu. Ovisi o kvaliteti i broju osjetnika na FPA mikročipu te o udaljenosti kamere od promatranog objekta.

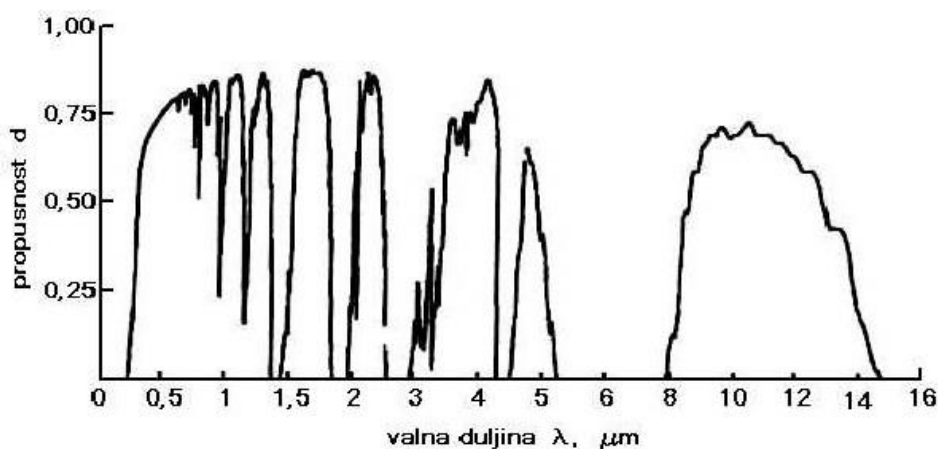
Brzina (frekvencija) obnove slike određuje brzinu promjene temperature koju kamera može pratiti. Današnje kamere imaju frekvenciju oko 30 Hz.

Točnost kamere iskazuje pouzdanost određivanja temperature pomoću termograma u slučaju optimalno podešenih parametara prilikom korištenja kamere. Izražava se dozvoljenim rasponom odstupanja očitane vrijednosti temperature od stvarne vrijednosti.

Najvažnije svojstvo promatranog objekta emisijski je faktor ε . Ako je neko tijelo nepropusno za zračenje, onda će se zračenje koje dolazi s njegove površine sastojati od vlastitog emitiranog zračenja koje ovisi o temperaturi tog tijela te od reflektiranog zračenja čiji se izvor nalazi u okolini te ovisi o temperaturi tijela u okolini. Udio vlastitog emitiranog zračenja proporcionalan je emisijskom faktoru ε . Na današnjim termografskim kamerama moguće je podešavati vrijednost emisijskog faktora kako bi se dobilo točno očitavanje temperature na površini promatranog tijela. Važno je svojstvo tijela i njegova geometrija, s obzirom da se emisijski faktor može mijenjati ovisno o kutu između pravca gledanja i normale površine tijela.

Postoji i mogućnost određivanja emisijskog faktora snimanjem termograma uz istovremeno mjerenje temperature tijela nekom drugom metodom, obično korištenjem termoparova. U tom se slučaju prilikom analize termograma namješta emisijski faktor dok se vrijednost temperature izmjerena termoparom ne podudara s temperaturom određenom na termogramu.

Prilikom analize termograma uvijek se mora uzeti u obzir utjecaj okoline na rezultate mjerenja termografskom kamerom. Potrebno je uzeti u obzir udaljenost između objekta i kamere zbog apsorpcije zračenja u mediju koji se između njih nalazi. Najčešće se radi o zraku, čija je propusnost za zračenje prikazana na sljedećoj slici.



Slika 4. Propusnost sloja atmosfere debljine 1000 m u ovisnosti o valnoj duljini zračenja (izvor: [8])

Termografske kamere na kojima se može podešavati fokus, odnosno izoštravati slika, automatski uzimaju u obzir umanjeni intenzitet zračenja zbog nepropusnosti atmosfere na temelju udaljenosti od objekta.

3.3. Analiza termograma

Zbog utjecaja okoline i svojstava snimane površine spomenutih u prošlom poglavlju, može se zaključiti da termogram prikazuje raspodjelu intenziteta zračenja, koja ne mora nužno biti jednaka raspodjeli temperature na snimanoj površini. Zračenje koje kamera registrira sastoji se od vlastitog emitiranog i reflektiranog zračenja objekata iz okoline, a ukupno registrirano zračenje može biti umanjeno zbog apsorpcije atmosfere. Zbog svega navedenog, temperatura očitana na termogramu može se nazvati prividnom temperaturom. Tek se točnim podešavanjem utjecajnih parametara na termogramu mogu dobiti stvarne vrijednosti temperature snimanih površina.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Kako bi bilo moguće odrediti potencijal uštede potrebne toplinske energije prilikom primjene visokoreflektivnog (VR) premaza za fasade, provedena su laboratorijska mjerenja radi utvrđivanja svojstava navedenog premaza. Prvi je cilj bio određivanje emisijskog faktora premaza, za dugovalno zračenje. Također, bilo je potrebno provesti mjerenje prilikom izlaganja premaza Sunčevom zračenju, kako bi se mogao napraviti model za određivanje faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za uzorak fasade s visokoreflektivnim premazom i za uzorak fasade bez takvog premaza. Prilikom izrade modela bilo je potrebno poznavati površinsku temperaturu prilikom izlaganja Sunčevom zračenju te emisijski faktor za dugovalno zračenje. Stoga je najprije provedeno laboratorijsko mjerenje s uzorcima u zatvorenom prostoru, radi određivanja emisijskog faktora za dugovalno zračenje.

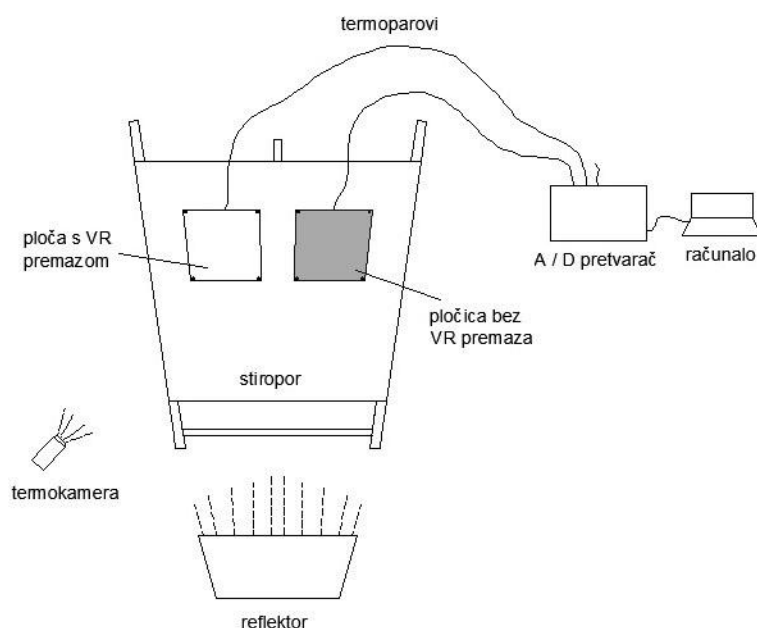
4.1. Određivanje emisijskog faktora visokoreflektivnog premaza za dugovalno zračenje

Mjerenje je provedeno u prostorijama Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u rujnu 2017. godine. Cilj mjerenja bio je izmjeriti temperature dviju ploča pomoću termoparova te snimiti termograme infracrvenog zračenja termografskom kamerom. Jedna je ploča premazana visokoreflektivnim bijelim premazom nepoznatog emisijskog faktora, a druga je crne boje, bez visokoreflektivnog premaza. Mjerenje je provedeno u svrhu određivanja emisijskog faktora visokoreflektivnog premaza za dugovalno zračenje, uspoređivanjem izmjerenih temperatura i temperatura prikazanih na snimljenim termogramima u računalnom programu Fluke SmartView 4.2.

4.1.1. Mjerna linija

Dvije ploče postavljene su na stiropor na stalku koji je postavljen na mjesto unutar laboratorija što dalje od okolnih predmeta i zidova koji bi svojim zračenjem mogli negativno utjecati na točnost rezultata mjerenja. Stiropor je korišten radi toplinske izolacije ploča. Na svaku od ploča pričvršćen je po jedan termopar tipa T (bakar – konstantan). Termoparovi su na drugom kraju priključeni na akvizicijski sustav, koji služi za prikupljanje podataka o izmjerenim temperaturama u proizvoljno određenim vremenskim intervalima. Prilikom ovog mjerenja

akvizicijski je sustav bilježio temperature svakih 30 sekundi. Akvizicijski sustav pretvara analogne signale u digitalne te je spojen na računalu u kojem su spremeni podaci dobiveni mjerenjem. Za zagrijavanje ploča korišten je reflektor koji je postavljen tako da većina svjetlosnih zraka upada okomito na površine ploča. Reflektor je postavljen u sredinu, između dviju ploča kako bi na svaku od ploča dospijevala otprilike jednaka količina zračenja. Termogrami su snimljeni pomoću termografske kamere Fluke Ti25. Mjerenje je provedeno uz tri različite udaljenosti reflektora od ploča (55, 70 i 120 cm). Shema mjerne linije prikazana je na Slici 5., a fotografija mjerne linije na Slici 6.



Slika 5. Shema mjerne linije u laboratoriju



Slika 6. Fotografija mjerne linije u laboratoriju

4.1.2. Mjerna oprema

Mjerna oprema korištena prilikom ovog mjerenja ima sljedeće komponente:

- termografska kamera „Fluke Ti25“
- kalibracijsko crno tijelo za umjeravanje termografske kamere „Omega BB702“
- akvizicijski sustav sačinjen od analogno-digitalnog pretvarača signala „Agilent Technologies AG1“ spojenog na računalo sa softverom za praćenje i bilježenje podataka „Benchlink Data Logger“
- tri termopara tipa T

4.1.2.1. Termografska kamera

Termografska kamera „Fluke Ti25“ korištena je za snimanje termograma, na kojima je prikazana raspodjela intenziteta infracrvenog zračenja na površinama promatranih ploča.



Slika 7. Termografska kamera „Fluke Ti25“

Karakteristike korištene termografske kamere navedene su u Tablici 1.

Tablica 1. Karakteristike termografske kamere

Područje mjerenja temperature	-20 °C do +350 °C
Točnost mjerenja	± 2°C ili 2 % (veća vrijednost)
Prostorna razlučivost	2,5 mRad
Brzina obnove slike	9 Hz
Vrsta osjetnika	160 x 120 FPA detektor, nehladeni mikrobolometar
Razlučivost temperaturnih razlika	0,09 °C pri temp. 30 °C
Razlučivost slike	640 x 480 piksela
Najmanji <i>span</i>	2,5 °C (<i>manual</i>); 5 °C (<i>auto</i>)
Ekran	9,1 cm dijagonala; VGA 640 x 480
Najmanja udaljenost snimanja	15 cm za snimanje IC zračenja

4.1.2.2. Kalibracijsko crno tijelo

Termografska kamera može pokazivati krivu temperaturu čak i kada su podaci o temperaturi okoline i emisijskog faktora točno podešeni. Kako bi se odredilo kolika je greška očitavanja kamere, prije snimanja termograma željenog objekta kameru je potrebno kalibrirati pomoću crnog tijela. Na crnom tijelu se postavlja temperatura otprilike jednaka onoj koliku ima objekt mjerenja, snima se termogram crnog tijela uz poznati emisijski faktor te se stvarna postavljena temperatura uspoređuje s onom koja je očitana na termogramu. Razlika tih dviju temperatura je greška termografske kamere.

**Slika 8. Kalibracijsko crno tijelo „Omega BB702“**

Karakteristike kalibracijskog crnog tijela su:

Tablica 2. Karakteristike kalibracijskog crnog tijela

Emisijski faktor	0,95
Raspon temperatura	10 °C do 215 °C
Prihvatljiva temperatura okoline	5 °C do 45 °C
Relativna vlažnost zraka okoline	0 – 90 %
Vrijeme zagrijavanja od temperature okoline do 204 °C	12 min
Promjer otvora crnog tijela	63,5 mm

4.1.2.3. Analogno – digitalni pretvarač signala

Prilikom mjerenja korišten je analogno – digitalni pretvarač signala. Proizvođač uređaja je tvrtka „Agilent Technologies“. Na pretvarač su spojena oba termopara korištena za mjerenje temperatura grijanih ploča te termopar kojim je mjerena temperatura okolnog zraka. Pretvaranje signala iz analognog u digitalni omogućava praćenje i spremanje podataka na računalu. Za vrijeme ovog mjerenja postavljeni je vremenski interval prikupljanja podataka o temperaturama iznosio 30 sekundi.



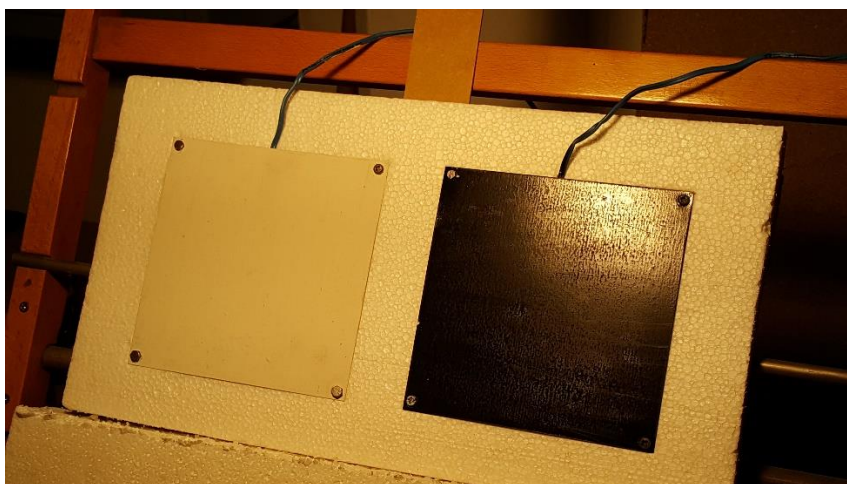
Slika 9. Analogno-digitalni pretvarač signala

4.1.2.4. Termoparovi

Temperatura ploča mjerena je termoparovima tipa T (bakar-konstantan). Termoparovi su preko analogno–digitalnog pretvarača spojeni na računalo. Jednim se termoparom pratila temperatura okolnog zraka.

4.1.3. Postupak mjerenja

Na početku prvog mjerenja reflektor snage 500 W postavljen je na udaljenost 120 cm od stalka s promatranim pločama. Termoparovi su pričvršćeni s donje strane svake ploče, između stiropora za izolaciju i ploče (Slika 10.). Nakon uključivanja reflektora, pričekano je postizanje stacionarnog stanja, odnosno konstantnih temperatura obiju ploča. Nakon postizanja stacionarnog stanja bilo je potrebno kalibrirati termografsku kameru te u nju unijeti potrebne podatke o stanju okoline.

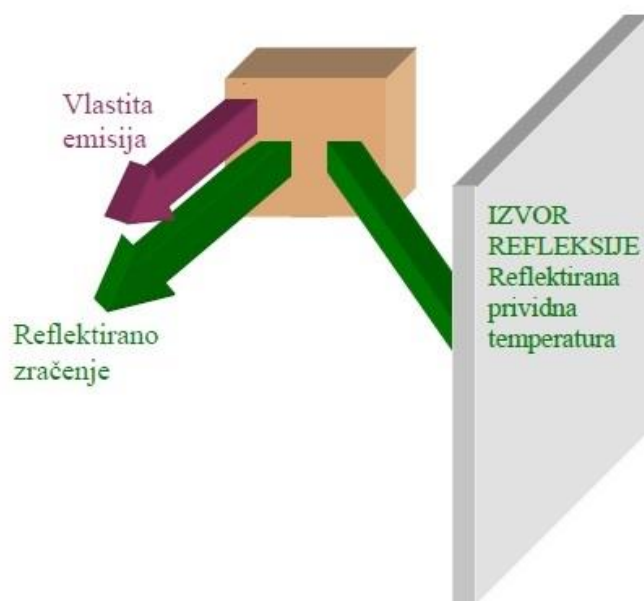


Slika 10. Ploča premazana VR premazom (lijevo) i ploča bez VR premaza (desno)

Prije snimanja termograma, bilo je potrebno odrediti prividnu reflektiranu temperaturu okoline. Ta se temperatura unosi u termografsku kameru ili prilikom analize slike u računalni program, kako bi se uzela u obzir greška očitavanja temperature površine zbog reflektiranog zračenja čiji je izvor u predmetima u okolini, s obzirom da faktor refleksije realnih površina nije jednak nuli. Pomoću podataka o emisijskom faktoru i prividnoj reflektiranoj temperaturi kamera ili računalni softver mogu iz ukupnog detektiranog zračenja s površine promatranog objekta izbaciti dio koji se odnosi na reflektirano zračenje.

Kako bi se prividna reflektirana temperatura odredila, najprije se određuje izvor reflektiranog zračenja. To su najčešće zidovi ili stijenke ostalih objekata koji se nalaze u okolini promatranog

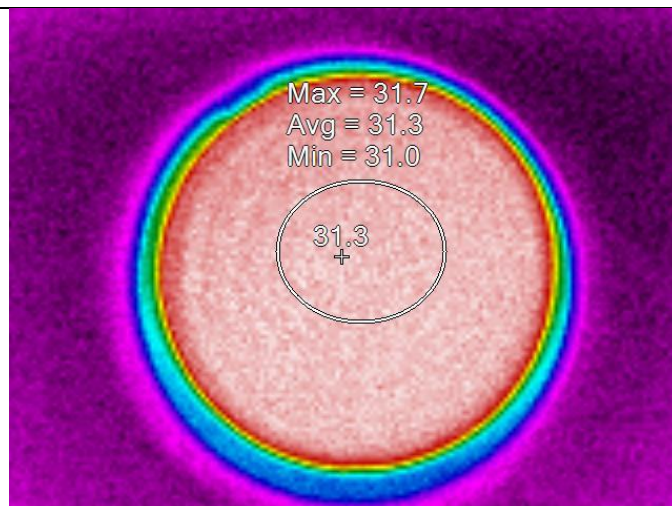
objekta. U ovom su slučaju to zidovi Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje, u kojem je mjerenje provedeno.



Slika 11. Prikaz izvora prividne reflektirane temperature (izvor: [8])

Kamera se postavlja pokraj ploča te okreće prema suprotnom smjeru (za 180°) te se usmjerava prema okolnim objektima koji gledaju prema dvama pločama. Vrijednost emisijskog faktora na kameri se postavlja na $\varepsilon = 1$ te se kamera izbacuje iz fokusa, kako bi se simulirala udaljenost do objekta jednaka 0 metara. To se čini radi uklanjanja utjecaja atmosfere. Na kameri koja je tako podešena očitava se prividna reflektirana temperatura te se taj podatak unosi u kameru.

Kako bi se kamera kalibrirala, iskorišteno je kalibracijsko crno tijelo „Omega BB702“. To je uređaj s malim otvorom, promjera 63,5 mm, poznatog emisijskog faktora $\varepsilon = 0,95$. Električnim grijačem unutar uređaja postiže se željena temperatura crnog tijela, postavljena tako da bude bliska onima koje se javljaju na površini snimanih ploča. U slučaju reflektora udaljenog 120 cm, temperatura crnog tijela za kalibraciju kamere postavljena je na 30 °C. Prosječna temperatura očitana na termografskoj kameri iznosi 31,3 °C. Može se zaključiti da je greška kamere prilikom mjerenja jednaka + 1,3 °C, što je uzeto u obzir prilikom analize snimljenih termograma.



Slika 12. Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 30 °C

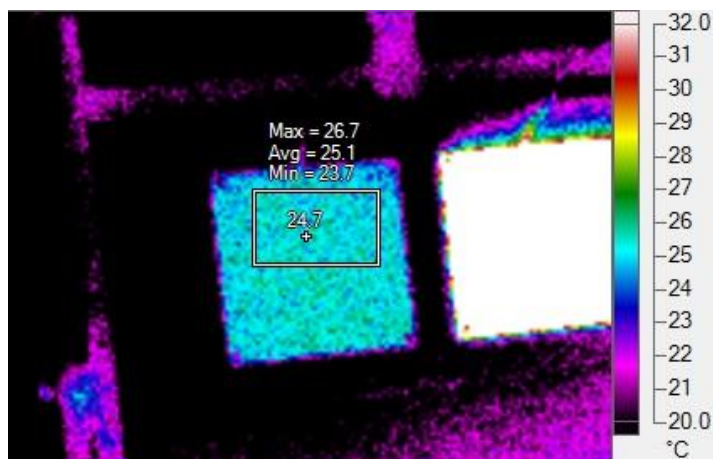
Nakon kalibracije crnog tijela snimljeno je nekoliko termograma ploče s visokoreflektivnim premazom te ploče bez navedenog premaza. S obzirom da je temperatura žarne niti reflektora puno veća od one koju postižu površine ploča te s obzirom da se reflektor nalazi relativno blizu ploča, prilikom snimanja termograma bilo je potrebno ukloniti utjecaj refleksije točkastog izvora zračenja na snimljenu raspodjelu intenziteta zračenja na površinama ploča. Stoga su termogrami snimani uz isključivanje reflektora te njegovo brzo zaklanjanje komadom kartona. Termogrami su snimani brzo, praktički u istom trenutku u kojem je reflektor zaklonjen, kako temperatura površina ploča ne bi u međuvremenu pala na nižu vrijednost.

4.1.4. Rezultati mjerenja i analiza

Po završetku mjerenja napravljena je analiza snimljenih termograma. Uspoređivanjem zabilježenih podataka o temperaturama izmjerenih termoparovima s temperaturama očitanim na termogramima, određeni su iznosi emisijskog faktora ispitivanih površina ploča. U nastavku su prikazani snimljeni termogrami te dobivene vrijednosti temperatura i emisijskog faktora.

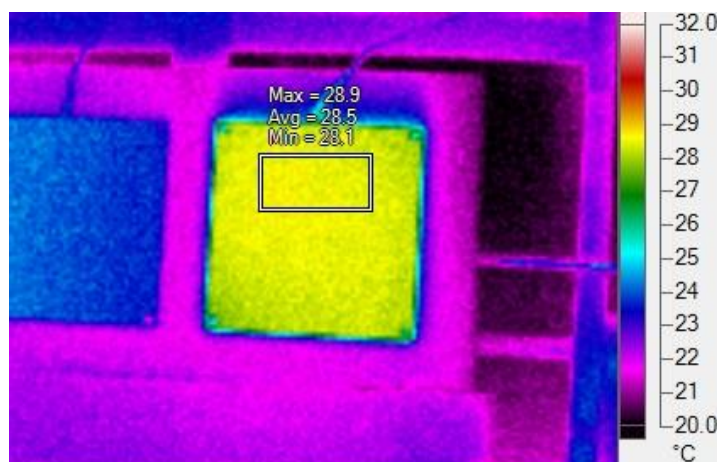
4.1.4.1. Udaljenost između reflektora i ploča 120 cm

Na prvom termogramu (Slika 13.) prikazana je raspodjela intenziteta zračenja s površine ploče premazane VR premazom zagrijavane reflektorom snage 500 W udaljenim 120 cm od ispitivane ploče.



Slika 13. Termogram površine s visokoreflektivnim premazom (udaljenost reflektora 120 cm)

Prije snimanja termograma određena je prividna reflektirana temperatura 23 °C. Temperatura ploče izmjerena termoparom iznosi 23,8 °C. U računalnom programu Fluke Smartview 4.2 emisijski faktor namješten je tako da očitana temperatura površine ploče bude za 1,3 °C viša od one koja je izmjerena termoparom, zbog greške termografske kamere određene na kalibracijskom crnom tijelu, što iznosi 25,1 °C. Dobivena je vrijednost emisijskog faktora $\varepsilon = 0,20$. Sljedeći termogram prikazuje raspodjelu intenziteta zračenja na ploči bez VR premaza. Za tu je ploču očekivana vrijednost emisijskog faktora oko 0,9.



Slika 14. Termogram površine bez visokoreflektivnog premaza (udaljenost reflektora 120 cm)

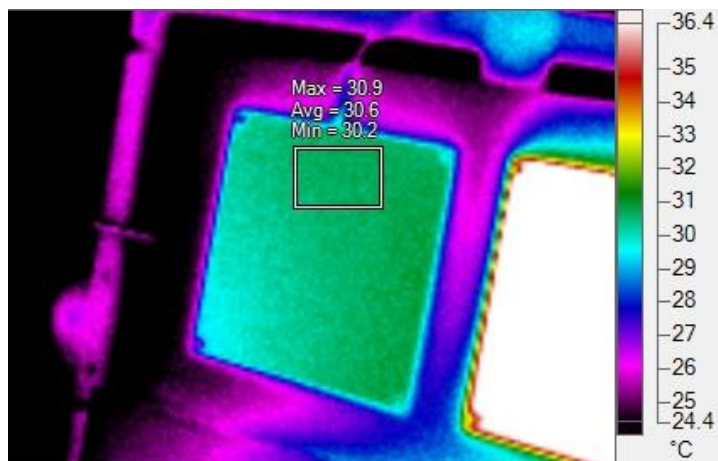
Izmjereni su i dobiveni sljedeći podaci:

- prividna reflektirana temperatura 23 °C
- temperatura ploče izmjerena termoparom 27,2 °C
- emisijski faktor površine $\varepsilon = 0,68$

Zbog neočekivano niskih rezultata emisijskih faktora površine te zbog veće razlike emisijskih faktora dviju površina od očekivane, mjerenje je ponovljeno uz manju udaljenost reflektora od ploča. Rezultati ovog mjerenja odbačeni su zbog velikog utjecaja grešaka u mjerenju na dobivene rezultate. Naime, razlike temperatura ploča i temperature okoline premale su s obzirom na utjecaj prividne reflektirane temperature, odnosno zračenja iz okoline. Zaključeno je da je potrebno povećati temperaturne razlike, što je postignuto postavljanjem reflektora na manju udaljenost od ispitivanih ploča.

4.1.4.2. Udaljenost između reflektora i ploča 70 cm

Kako bi se povećale temperaturne razlike prilikom mjerenja, reflektor je postavljen na 70 cm od ispitivanih ploča.

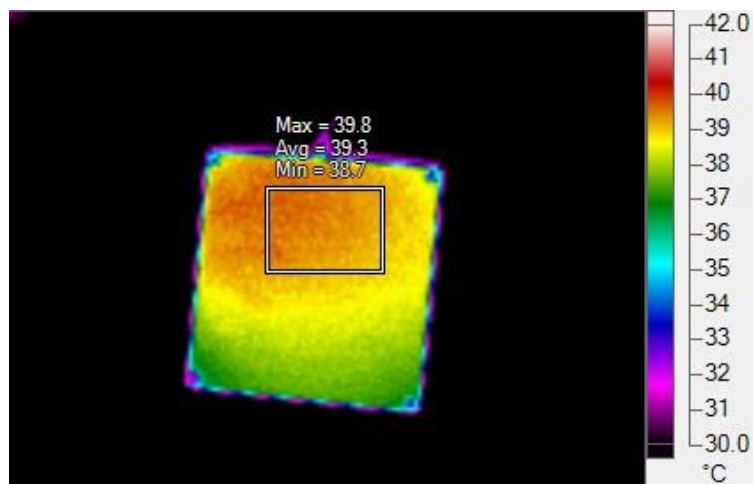


Slika 15. Termogram površine s visokoreflektivnim premazom (udaljenost reflektora 70 cm)

Mjerenjem temperature i analizom termograma ploče premazane VR premazom dobiveni su sljedeći podaci:

- prividna reflektirana temperatura 23 °C
- temperatura ploče izmjerena termoparom 29,3 °C
- emisijski faktor površine $\varepsilon = 0,81$

Osim termograma površine s VR premazom, snimljen je i termogram površine bez VR premaza. Taj termogram prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 16. Termogram površine bez visokoreflektivnog premaza (udaljenost reflektora 70 cm)

Mjerenjem temperature i analizom termograma dobiveni su sljedeći podaci:

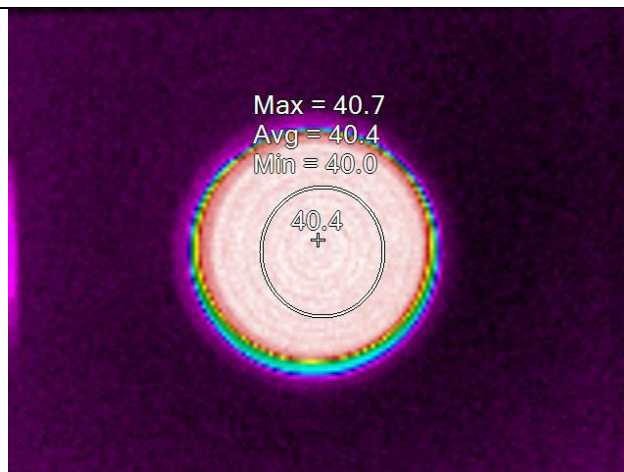
- prividna reflektirana temperatura 23 °C
- temperatura ploče izmjerena termoparom 38 °C
- emisijski faktor površine $\varepsilon = 0,89$

Analizom rezultata ovog mjerenja dobivene su vrijednosti emisijskih faktora površina koje su znatno bliže očekivanima. To osobito vrijedi za crnu površinu bez VR premaza, za koju je određena vrijednost emisijskog faktora 0,89. No, očekivana vrijednost emisijskog faktora površine s VR premazom bila je također oko 0,9. Stoga je napravljeno i treće mjerenje, uz još manju udaljenost reflektora od ispitivanih ploča.

4.1.4.3. Udaljenost između reflektora i ploča 55 cm

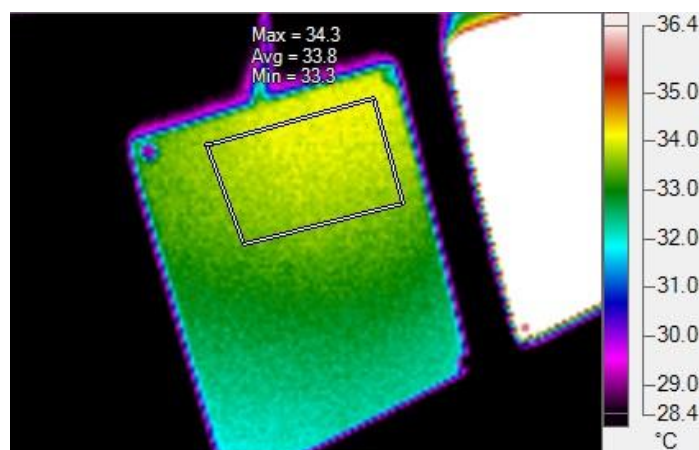
Prije trećeg mjerenja radi utvrđivanja emisijskog faktora visokoreflektivnog premaza za dugovalno zračenje, reflektor je postavljen na 55 cm od ispitivanih ploča. U ovom su mjerenju postignute najveće razlike temperatura ploča i okoline te je očekivana najmanja greška prilikom mjerenja. Mjerenje je obavljeno tri dana nakon prethodna dva mjerenja.

Termografska kamera ponovno je kalibrirana pomoću crnog tijela. Za ovo mjerenje odabrana je temperatura kalibracijskog crnog tijela 40 °C. Određena je greška kamere + 0,4 °C.



Slika 17. Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 40 °C

Snimljen je termogram površine premazane visokoreflektivnim premazom. Termogram je prikazan na sljedećoj slici.

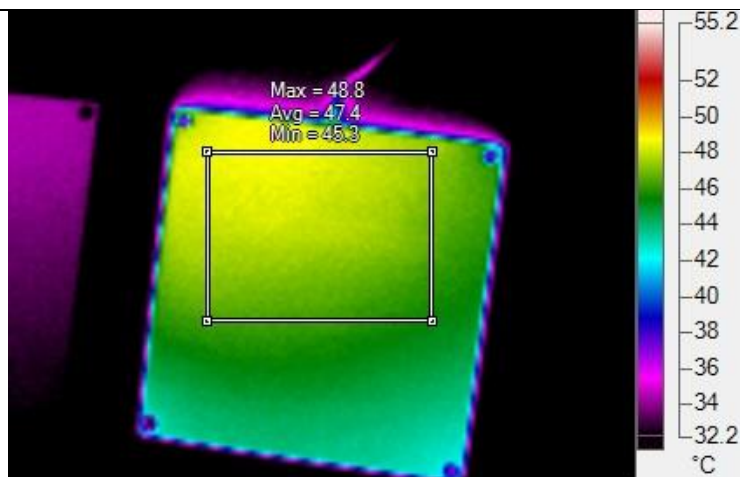


Slika 18. Termogram površine s visokoreflektivnim premazom (udaljenost reflektora 55 cm)

Mjerenjem temperature i analizom termograma dobiveni su sljedeći podaci:

- prividna reflektirana temperatura 24 °C
- temperatura ploče izmjerena termoparom 33,4 °C
- emisijski faktor površine $\varepsilon = 0,90$

Snimljen je i termogram ploče s površinom bez VR premaza, prikazan na sljedećoj slici.



Slika 19. Termogram površine bez visokoreflektivnog premaza (udaljenost reflektora 55 cm)

Mjerenjem temperature i analizom termograma dobiveni su sljedeći podaci:

- prividna reflektirana temperatura 25 °C
- temperatura ploče izmjerena termoparom 46,9 °C
- emisijski faktor površine $\varepsilon = 0,92$

Na Slici 19. prosječna temperatura promatrane površine dobivena podešavanjem vrijednosti emisijskog faktora iznosi 47,4 °C što je za 0,5 °C više od očitavanja dobivenog mjerenjem termoparom i za 0,1 °C više od određene greške termografske kamere. Razlog zbog kojeg razlika temperature mjerene termoparom i one određene termografskom kamerom nije jednaka 0,4 °C je u tome što se u ovom slučaju prilikom promjene emisijskog faktora za 0,01 vrijednost temperature određene pomoću termograma mijenja za 0,2 do 0,3 °C u području temperatura oko 47 °C.

Rezultati dobiveni mjerenjem s reflektorom na udaljenosti 55 cm od dviju ploča odgovaraju očekivanim rezultatima prije početka mjerenja. U Tablici 3. prikazani su rezultati analize termograma snimljenih tijekom tri navedena mjerenja. Uz manje razlike između temperature ploče i temperature okoline, dobivene su niže vrijednosti emisijskog faktora. U tim je slučajevima veći utjecaj prividne reflektirane temperature, odnosno zračenja iz okoline, na određene vrijednosti emisijskog faktora dugovalnog zračenja. Prema tome, što je veća razlika temperature ploče i temperature okoline, točnija je određena vrijednost emisijskog faktora dugovalnog zračenja.

Tablica 3. Rezultati provedenih mjerenja radi određivanja emisijskog faktora dugovalnog zračenja visokoreflektivnog premaza

Površina ploče	Udaljenost reflektora	Prividna reflektirana temperatura	Temperatura ploče izmjerena termoparom	Emisijski faktor
VR premaz	120 cm	23 °C	23,8 °C	0,20
Bez premaza	120 cm	23 °C	27,2 °C	0,68
VR premaz	70 cm	23 °C	29,3 °C	0,81
Bez premaza	70 cm	23 °C	38 °C	0,89
VR premaz	55 cm	24 °C	33,4 °C	0,90
Bez premaza	55 cm	25 °C	46,9 °C	0,92

Iz rezultata provedenih mjerenja može se zaključiti da visokoreflektivni premaz za fasade neće značajno utjecati na dugovalno zračenje emitirano od zidova zgrade prema van, s obzirom da su vrijednosti emisijskih faktora površina sa i bez VR premaza vrlo slične te iznose otprilike 0,9.

4.1.5. Kontrolno mjerenje prilikom određivanja emisijskog faktora uz korištenje električne grijalice

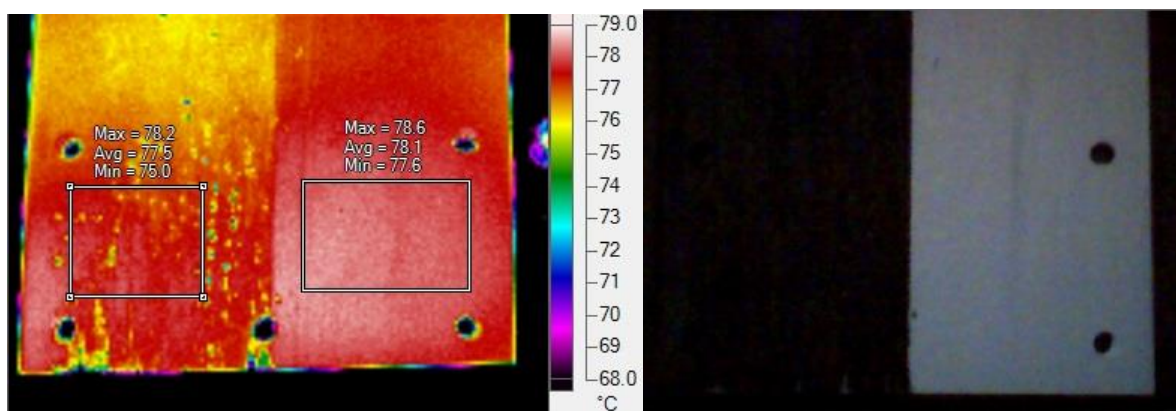
Kako bi se usporedila svojstva površina sa i bez visokoreflektivnog premaza, napravljen je pokušaj dodatnog mjerenja, u kojem je metalna pločica postavljena na električnu grijalicu. Pola pločice premazano je VR premazom, dok je druga polovica bila bez tog premaza. Temperatura je mjerena kontaktnim termometrom, a termogrami su snimljeni termografskom kamerom opisanom u poglavlju 4.1.2.1. Mjerna linija prikazana je na Slici 20.

**Slika 20. Mjerna linija s električnom grijalicom**

Prilikom mjerenja temperature kontaktnim termometrom primijećen je problem točnog određivanja temperature na površini ploča. Naime, kontakti je termometar pokazivao velika odstupanja temperature po površini ploča, otprilike $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ovisno o točki na koju je kontakti termometar bio postavljen. Mogući razlog tome može se tražiti u nedovoljnoj uniformnosti grijaće ploče kojom se ispitivana pločica zagrijavala, što je dovodilo do nejednakosti temperatura po površini pločice. Ipak, kontakti je termometar pokazivao otprilike jednake temperature po cijeloj pločici, u rasponu od $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ neovisno o tome je li pločica premazana ili ne. Snimljen je i termogram koji je potvrdio da je temperatura pločice otprilike jednaka po cijeloj njenoj površini te da su emisijski faktori za dugovalno zračenje podjednaki, neovisno o postojanju VR premaza ili ne.

Prilikom snimanja termograma postavljeni su sljedeći parametri:

- prividna reflektirana temperatura $22\text{ }^{\circ}\text{C}$
- emisijski faktor površine $\varepsilon = 0,91$



Slika 21. Pločica grijana električnom grijalicom (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje)

Iz termograma se može zaključiti da je očitana prosječna temperatura dijela pločice bez premaza (crni dio) za $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ manja od prosječne temperatura premazanog dijela pločice. Dakle, očitane temperature otprilike su jednake, ali zbog nedovoljno kvalitetne električne grijalice i netočnosti mjerenja kontaktnim termometrom, rezultati ovog mjerenja nisu korišteni u daljnjim razmatranjima.

4.2. Mjerenja uz izlaganje visokoreflektivnog premaza Sunčevom zračenju

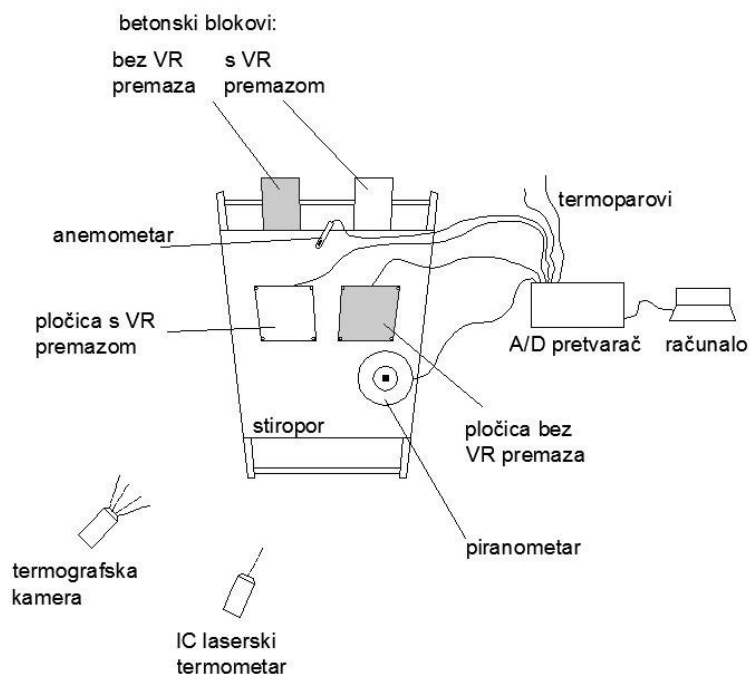
Nakon prvih provedenih mjerenja u laboratoriju određen je emisijski faktor dugovalnog zračenja crne površine bez visokoreflektivnog premaza te površine premazane visokoreflektivnim premazom. Taj podatak iskorišten je kako bi se odredio faktor apsorpcije VR premaza za kratkovalno Sunčevo zračenje. U svrhu određivanja faktora apsorpcije za kratkovalno zračenje bilo je potrebno provesti mjerenja u kojima se prethodno korištene metalne površine izlažu Sunčevom zračenju. Ta su mjerenja provedena u listopadu 2017. ispred Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Cilj mjerenja bio je izmjeriti temperature dviju ploča postavljenih na stalak, od kojih je jedna premazana VR premazom. Za usporedbu, mjerene su i temperature betonskih blokova, jednog premazanog VR premazom i jednog premazanog običnom fasadnom bojom. Njihova je temperatura mjerena beskontaktno, korištenjem infracrvenog laserskog termometra. Uz mjerenje temperatura ploča, korištena je i dodatna mjerna oprema za mjerenje brzine vjetra te za mjerenje insolacije. Također, snimljeni su i termogrami svih ispitivanih površina.

4.2.1. Mjerna linija

Dvije ploče pričvršćene su na komad stiropora koji je postavljen na stalak, slično kao u prvom mjerenju unutar laboratorija. S njihove stražnje strane, između ploče i stiropora postavljen je termopar koji mjeri temperaturu ploče. Iznad ploča postavljen je anemometar radi mjerenja brzine vjetra. Pokraj ploča na stalak je postavljen i piranometar kojim je mjerena insolacija. Dva su dodatna termopara iskorištena za mjerenje temperature zraka u okolišu na dva mjesta iza stalka. Ti su termoparovi omotani aluminijskom folijom koja je postavljena tako da zaštiti termopar od utjecaja vjetra i dozračivanja topline iz okoline, ali bez postojanja kontakta termopara i folije.

Svi mjerni uređaji spojeni su na akvizicijski sustav koji je prikupljao podatke o izmjenjenim temperaturama te o naponima na anemometru i piranometru. Naponi su kasnije pomoću poznatih karakteristika mjernih uređaja preračunati u tražene podatke o brzini vjetra i insolaciji. Interval bilježenja prikupljenih podataka na akvizicijskom sustavu iznosio je 60 sekundi. Akvizicijski je sustav bio spojen na računalo te su podaci očitavani i spremeni pomoću računalnog programa "Benchlink Data Logger".

Povremeno su snimani i termogrami korištenjem termografske kamere te su mjerene temperature ispitivanih površina pomoću infracrvenog laserskog termometra. Shema mjerne linije prikazana je na Slici 22., a fotografija mjerne linije na Slici 23.



Slika 22. Shema mjerne linije ispred laboratorija



Slika 23. Fotografija mjerne linije ispred laboratorija

4.2.2. Mjerna oprema

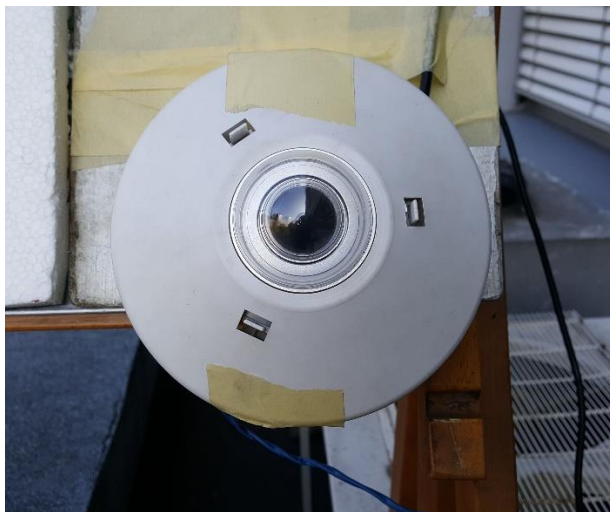
Mjerna oprema korištena prilikom vanjskog mjerenja sastoji se od sljedećih dijelova:

- termografska kamera „Fluke Ti25“
- kalibracijsko crno tijelo za umjeravanje termografske kamere „Omega BB702“
- akvizicijski sustav sačinjen od analogno-digitalnog pretvarača signala „Agilent Technologies AG1“ spojenog na računalo sa softverom za praćenje i bilježenje podataka „Benchlink Data Logger“
- četiri termopara tipa T
- termoelektrični piranometar
- infracrveni pirometar (laserski termometar) „Fluke 62 Mini IR Thermometer Gun“
- anemometar sa žarnom niti
- pomoćni anemometar s rotirajućim vrhom „Schiltknecht MiniAir“

Termografska kamera, kalibracijsko crno tijelo, termoparovi te akvizicijski sustav detaljnije su opisani u poglavlju 4.1.2. Ostatak opreme opisan je u nastavku.

4.2.2.1. Piranometar

Prilikom mjerenja u svrhu određivanja emisijskog faktora za kratkovalno zračenje korišten je piranometar radi prikupljanja podataka o insolaciji. Podatak o insolaciji govori kako se mijenja količina dozračene energije sa Sunca na ispitivane površine tijekom mjerenja. Korišten je termoelektrični piranometar prikazan na Slici 24.



Slika 24. Piranometar

Korišten je termoelektrični piranometar spojen na analogno-digitalni pretavarač u akvizicijskom sustavu. U računalu su pohranjivani podaci o naponu na piranometru, a prilikom analize rezultata mjerenja ti su podaci preračunati u podatke o insolaciji, koristeći konstantu piranometra.

Konstanta piranometra: $5,11 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$

Termoelektrični piranometar sastoji se od dvije staklene polukugle ispod kojih je postavljena crna ugljična pločica. Polukugle štite pločicu od vanjskih utjecaja te sprječavaju utjecaj konvekcije na temperaturu pločice. Ispod spomenute pločice nalazi se još jedna pločica, na koju ne upada Sunčevo zračenje. S obzirom da su postavljene vrlo blizu jedna drugoj, jedini uzrok razlike njihovih temperatura je dospjelo Sunčevo zračenje na gornju pločicu. Između pločica nalazi se senzor koji ovisno o razlici temperatura dviju pločica daje napon, koji se očitava na akvizicijskom sustavu. Dijeljenjem napona s konstantom piranometra dobiva se iznos insolacije u nekom trenutku.

4.2.2.2. Infracrveni pirometar

Infracrveni pirometar „Fluke 62 Mini IR Thermometer Gun“ korišten je za kontrolno mjerenje temperature ispitivanih metalnih površina te za mjerenje temperaure na površini betonskih blokova.



Slika 25. Infracrveni pirometar

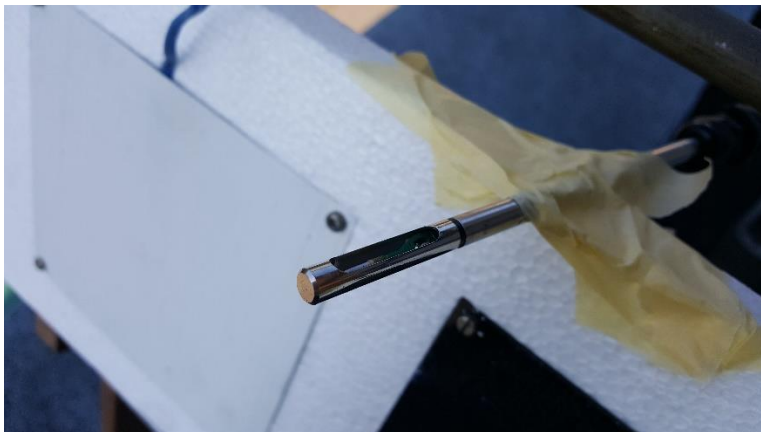
Karakteristike korištenog infracrvenog pirometra su:

- točnost $\pm 1,5$ % očitane vrijednosti
- raspon temperatura od -30 °C do 500 °C
- emisijski faktor postavljen na $\varepsilon = 0,95$

S obzirom na nepreciznost očitavanja i razliku emisijskog faktora za dugovalno zračenje ispitivanih površina i emisijskog faktora prema kojem IC pirometar određuje temperaturu površine, očekivana je greška u mjerenju temperature pomoću ovog uređaja. Infracrveni pirometar očitava dospjelo infracrveno zračenje s površine prema kojoj je usmjerena crvena laserska zraka iz pirometra te pokazuje temperaturu površine za emisijski faktor 0,95.

4.2.2.3. Anemometar sa žarnom niti

Za mjerenje brzine vjetra koji struji paralelno s ispitivanim pločama korišten je anemometar sa žarnom niti postavljen na stalku iznad i između dviju ploča. Promjenom brzine vjetra mijenja se i temperatura žarne niti koja je zagrijana električnom strujom. Zbog promjene temperature niti, mijenja se i njen otpor protjecanju električne struje te dolazi do promjene napona očitavanog na računalu. Uz poznat odnos napona i brzine vjetra, moguće je izračunati brzinu vjetra u svakom trenutku mjerenja.



Slika 26. Anemometar sa žarnom niti

Na korištenom anemometru raspon napona $0 - 10$ V odgovara rasponu brzine vjetra $0 - 3$ m/s.

4.2.2.4. Pomoćni anemometar s rotirajućim vrhom

Za kontrolu mjerenja brzine vjetra u nekoliko je navrata iskorišten i anemometar s rotirajućim vrhom „Schiltknecht MiniAir“, prikazan na sljedećoj slici. Vjetar pomiče rotirajući vrh anemometra te se vrh okreće brže što je brzina vjetra veća. Ovaj anemometar nema spoj s akvizicijskim sustavom, već je korišten i očitavan ručno.



Slika 27. Anemometar s rotirajućim vrhom

4.2.3. Postupak mjerenja

Provedena su dva vanjska mjerenja, oba na jednak način, opisan u ovom poglavlju. U oba su mjerenja po jedna ploča i jedan betonski blok bili premazani visokoreflektivnim premazom. U prvom se mjerenju uz ploču s VR premazom nalazila ploča crne boje bez VR premaza, a uz betonski blok s VR premazom nalazio se betonski blok čija je jedna polovina bila crne boje, dok je druga polovina bila obične žute fasadne boje. U drugom su se mjerenju uz ploču i betonski blok s VR premazom nalazili ploča i betonski blok premazani s običnom bijelom fasadnom bojom.

Ploče su postavljene na stiropor koji je zatim postavljen na stalak. Između ploče i stiropora pričvršćen je termopar radi mjerenja temperature ploča. Iznad ploča pričvršćen je anemometar sa žarnom niti, postavljen tako da mjeri brzinu vjetra u smjeru paralelnom s ispitivanim pločama. Pokraj stiropora s pločama postavljen je i piranometar za mjerenje Sunčeve insolacije. Iznad stiropora postavljena su dva prethodno opisana betonska bloka. Betonski blokovi ispitivani su s obzirom da imaju različite karakteristike u odnosu na metalne ploče. Betonski su blokovi veće mase od metalnih ploča te je potrebno puno dulje vrijeme da postignu stacionarnu

temperaturu. Također, vjetar ih hladi puno sporije od metalnih ploča, čije temperature mogu brzo pasti čim se brzina vjetra naglo poveća.

Iza stalka postavljena su dva termopara. Oba termopara omotana su aluminijskom folijom radi smanjenja utjecaja vjetra i dozračene topline iz okoliša na vrhove termoparova. Ta dva termopara korištena su za mjerenje temperature zraka u okolišu. Temperatura okoliša prilikom vanjskog mjerenja važna je iz nekoliko razloga. Koristi se kako bi se odredila približna temperatura neba, koja se kasnije koristi u proračunu emisijskog faktora za kratkovalno zračenje. Osim u proračunu, temperatura neba postavlja se kao pozadinska temperatura prilikom analize snimljenih termograma. Temperatura neba dobiva se tako da se izmjerena temperatura okolišnjeg zraka umanji za 6 do 12 °C. Također, temperatura okoliša potrebna je za izračunavanje topline izmijenjene konvekcijom između ploča i zraka u okolišu.

Nakon što je sva mjerna oprema postavljena na stalak, bilo ju je potrebno spojiti na akvizicijski sustav te započeti zapisivanje izmjerenih podataka na računalu. Vremenski interval bilježenja podataka postavljen je na 60 sekundi. Nakon postavljanja i spajanja mjerne linije bilo je potrebno pričekati dolazak Sunčevih zraka na mjernu liniju.

Termografska kamera umjerena je na kalibracijskom crnom tijelu. Prilikom mjerenja s pločom crne boje bez VR premaza i s pločom premazanom VR premazom, temperatura je kalibracijskog crnog tijela postavljena na 50 °C. Prilikom mjerenja s pločom premazanom običnom bijelom fasadnom bojom i s pločom premazanom VR premazom, temperatura kalibracijskog crnog tijela postavljena je na 40 °C.

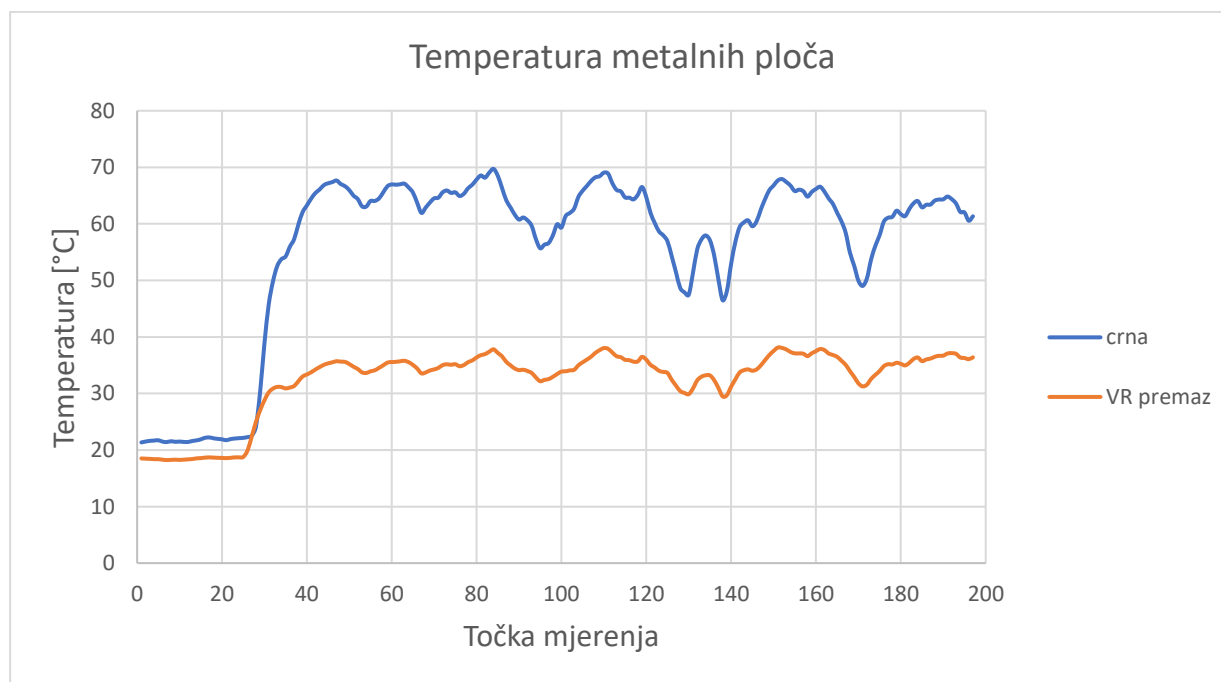
Tijekom mjerenja snimljeno je nekoliko termograma ispitivanih površina. Termogrami su snimani svakih 15 do 20 minuta, a za analizu mjerenja odabrani su oni snimljeni za vrijeme najizraženije stacionarnosti temperatura ploča. Prilikom svakog snimanja termograma napravljeno je i mjerenje temperature infracrvenim pirometrom. Temperature metalnih ploča izmjerene IC pirometrom kasnije su uspoređene s onima izmjerenim pomoću termoparova, kako bi se odredila greška u mjerenju pirometrom. IC pirometar jedini je uređaj kojim je mjerena temperatura površine betonskih blokova. Greška određena usporedbom s termoparovima uzeta je u obzir prilikom određivanja temperature površina betonskih blokova. Zbog nepreciznosti IC pirometra, u analizi je veća pozornost pridana metalnim pločama čije su temperature mjerene i termoparovima.

4.2.4. Rezultati mjerenja i analiza

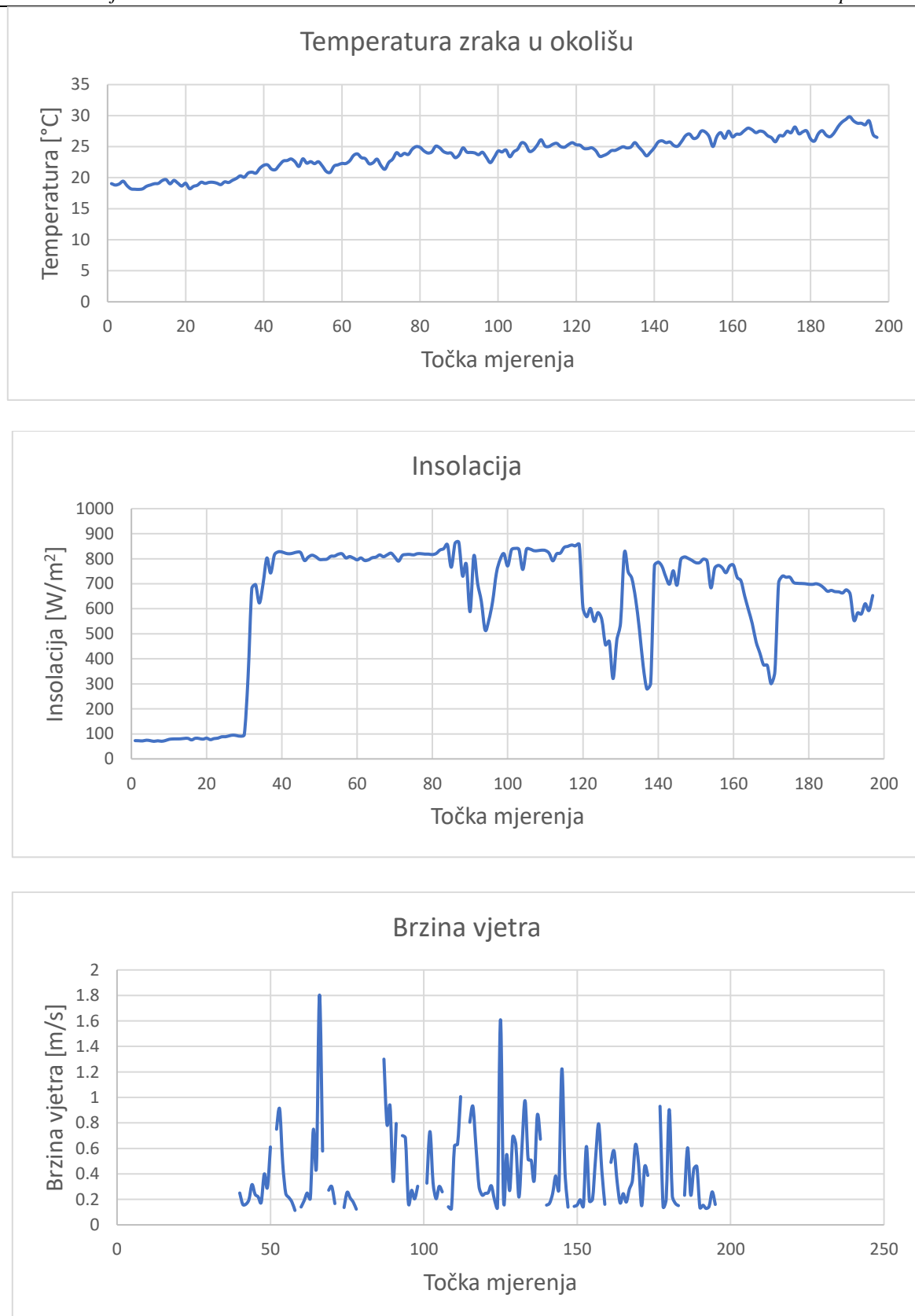
Po završetku mjerenja, rezultati prikupljeni akvizicijskim sustavom unešeni su u računalni program Microsoft Excel te je napravljena analiza mjerenja. Također, napravljena je i analiza snimljenih termograma, korištenjem računalnog programa Fluke SmartView 4.2. Analizom rezultata mjerenja željelo se dobiti točne vrijednosti insolacije, brzine vjeta te srednje izmjerene temperature zraka u okolišu koja je mjerena na dva mjesta. Temperatura okolišnjeg zraka korištena je za određivanje temperature neba. Pomoću određene brzine vjeta i izmjerenih temperatura željelo se odrediti koeficijent prijelaza topline konvekcijom između ispitivanih ploča i okolišnjeg zraka. Podaci dobiveni analizom mjerenja bili su potrebni u kasnije izrađenom i korištenom modelu za određivanje koeficijenta apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za sve ispitivane površine.

4.2.4.1. Mjerenje s pločom premazanom VR premazom i s crnom pločom bez VR premaza

U nastavku su prikazani dijagrami promjene temperature ispitivanih površina te dijagrami promjene temperature okoliša, insolacije i vjeta.



Slika 28. Dijagram promjene temperature ploče s crnom površinom i ploče s VR površinom prilikom izlaganja Sunčevom zračenju



Slika 29. Dijagrami: a) temperatura zraka u okolišu; b) insolacija; c) brzina vjetra prilikom vanjskog mjerenja s pločama crne i VR površine

Za detaljniju analizu su odabrani prikupljeni podaci u intervalu od 49. do 78. točke mjerenja, s obzirom da je u tom području primijećena najizraženija stacionarnost insolacije i temperatura obiju ispitivanih površina. Određena je srednja vrijednost za sve prikupljene podatke u tim točkama.

Tablica 4. Rezultati vanjskog mjerenja s pločama crne i visokoreflektivne površine

Temperatura ploče s VR premazom	34,79 °C
Temperatura crne ploče	65,12 °C
Temperatura zraka u okolišu	22,65 °C
Insolacija	808,37 W/m ²
Brzina vjetra	0,393 m/s

Iz dobivenih rezultata može se primijetiti da se ploča crne površine zagrijala na znatno višu temperaturu od ploče s VR premazom. Podatak o temperaturi zraka u okolišu iskorišten je za određivanje temperature neba. Prosječna temperaturna razlika zraka i neba iznosi 6 do 12 °C, a prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 [6], temperaturna razlika iznosi otprilike 10 °C. Iz toga slijedi da je temperatura neba za ovo mjerenje jednaka:

$$\vartheta_{\text{nebo}} = \vartheta_{\text{ok}} - \Delta\vartheta_{\text{er}} = 22,65 - 10 = 12,65 \text{ °C} \quad (20)$$

Uz poznate podatke o temperaturama i brzini vjetra, može se pristupiti određivanju koeficijenata prijelaza topline konvekcijom za obje ploče. U literaturi postoji mnogo različitih izraza za određivanje Nusseltovog broja, koji se koristi za određivanje koeficijenta prijelaza topline. Također, važno je naglasiti da se neki izrazi koriste za proračun uz uvjet postojanja samo slobodne konvekcije, drugi izrazi koriste se uz uvjet postojanja vrlo izražene prisilne konvekcije, dok postoje i izrazi za određivanje koeficijenta prijelaza topline u području u kojem postoji istovremeni utjecaj slobodne i prisilne konvekcije. Za izmjereni iznos brzine vjetra pretpostavlja se da se između ploča i okolišnjeg zraka javlja upravo istovremeni utjecaj slobodne i prisilne konvekcije. No, s obzirom da je teško intuitivno zaključiti kakvi su uvjeti vladali tijekom provođenja mjerenja, u analizi je iskorišteno više različitih izraza.

Prema [7], iznosi koeficijenta prijelaza topline slobodnom konvekcijom u plinovima kreću se između 5 i 30 W/(m²K), dok su za prisilnu konvekciju između 30 i 300 W/(m²K).

U nastavku su navedeni korišteni izrazi.

Za slobodnu konvekciju, prema [9]:

$$Nu = 0,129 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

$$Nu = 0,48 \cdot Gr^{\frac{1}{4}} \quad (22)$$

$$Nu = 0,555 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad (23)$$

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad (24)$$

$$Nu = 0,11 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} + Ra^{\frac{1}{10}} \quad (25)$$

Za prisilnu konvekciju, [9]:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

Za istovremenu slobodnu i prisilnu konvekciju, [10]:

$$\alpha = 5,7 + 3,8 \cdot w \quad (27)$$

Kako bi se proračun mogao provesti, pomoću Toplinskih tablica [11] linearnom interpolacijom određena su svojstva zraka za srednje temperature ploča u promatranom vremenskom intervalu te su izračunate sve potrebne bezdimenzijske značajke.

Tablica 5. Svojstva zraka (prvo vanjsko mjerenje)

	Uz ploču s VR premazom	Uz crnu ploču
Temperatura zraka, ϑ [°C]	34,79	65,12
Dinamička viskoznost, μ [Pa s]	$1,891 \cdot 10^{-5}$	$2,029 \cdot 10^{-5}$
Specifični toplinski kapacitet, c_p [J/(kg K)]	1006,94	1009,36
Toplinska provodnost, λ [W/(m K)]	0,02665	0,02882
Gustoća, ρ [kg/m ³]	1,132	1,03

Izrazi za bezdimenzijske značajke potrebne u proračunu koeficijenta konvektivnog prijelaza topline su:

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot L}{\mu} \quad (28)$$

Prandtlova značajka:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (29)$$

Grashofova značajka:

$$Gr = \frac{T - T_{ok}}{T_{ok}} \cdot g \cdot \frac{L^3}{\nu^2} \quad (30)$$

Rayleighova značajka:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (31)$$

Nusseltova značajka:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (32)$$

Karakteristična dimenzija (duljina) svake ploče iznosi:

$$L = 0,2 \text{ m}$$

Pomoću podataka dobivenih mjerenjem, poznatih svojstava zraka te prethodno navedenih izraza, ušlo se u proračun koeficijenta prijelaza topline. Vrijednosti izračunatih bezdimenzijskih značajki prikazane su u Tablici 6.:

Tablica 6. Bezdimenzijske značajke za zrak uz ploče s crnom i VR površinom

Bezdimenzijska značajka	Zrak uz ploču s VR premazom	Zrak uz crnu ploču
Re	4700	3987
Pr	0,7144	0,7106
Gr	11543626	29045995
Ra	8246497	20641211

Nakon određivanja bezdimenzijskih značajki, izračunate su vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom. Vrijednosti su navedene u sljedećoj tablici:

Tablica 7. Izračunati koeficijenti prijelaza topline uz ploče s crnom i VR površinom

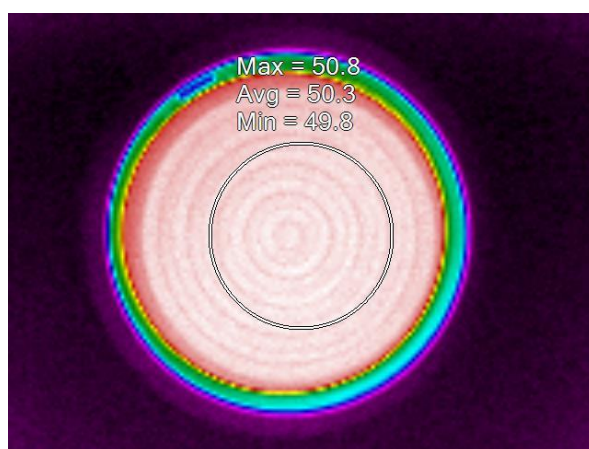
Izraz	α [W/(m ² K)] uz ploču s VR premazom	α [W/(m ² K)] uz crnu ploču
$Nu = 0,129 \cdot Ra^{\frac{1}{3}}$	3,47	5,10
$Nu = 0,48 \cdot Gr^{\frac{1}{4}}$	3,73	5,08
$Nu = 0,555 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}$	3,96	5,39
$Nu = 0,54 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}$	3,86	5,24
$Nu = 0,11 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} + Ra^{\frac{1}{10}}$	3,62	5,12
$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$	5,42	5,39
$\alpha = 5,7 + 3,8 \cdot w$	7,19	7,19

Ako se koeficijenti prijelaza topline izračunati prema izrazima za slobodnu konvekciju, (21) - (25), usporede s očekivanim vrijednostima koeficijenta konvektivnog prijelaza topline u plinovima pri uvjetima slobodne konvekcije, dolazi se do zaključka da izračunati koeficijenti imaju premale vrijednosti. Isto tako, koeficijent prijelaza topline izračunat prema izrazu za uvjete prisilne konvekcije ispada puno niži od očekivanih. Koeficijent prijelaza topline izračunat prema izrazu za uvjete istovremene slobodne i prisilne konvekcije daje rezultate koji su najbliži očekivanima.

S obzirom na naglu promjenjivost brzine vjetra, uz prikupljanje podataka akvizicijskim sustavom s intervalom 60 sekundi, može se pretpostaviti da je koeficijent konvektivnog prijelaza topline između površine ploče i okolišnjeg zraka tijekom mjerenja iznosio između 7 i 11 W/(m² K). Taj je podatak kasnije iskorišten u proračunu faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja.

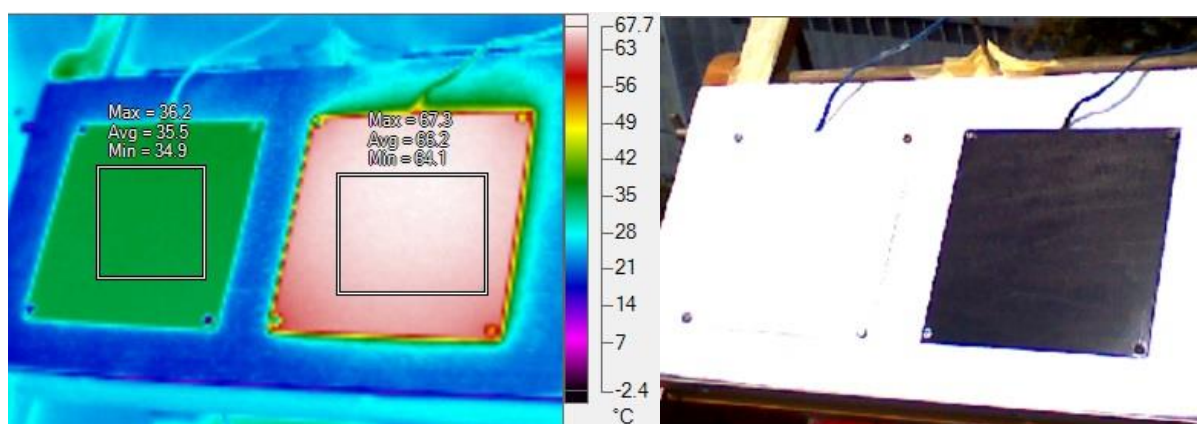
Uz analizu podataka prikupljenih na računalu pomoću akvizicijskog sustava, napravljena je i analiza termograma snimljenih termografskom kamerom za vrijeme trajanja ovog mjerenja.

Termografska kamera umjerena je na kalibracijskom crnom tijelu čija je temperatura postavljena na 50 °C. Određena je greška kamere + 0,3 °C.



Slika 30. Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 50 °C

Prilikom mjerenja snimljeno je nekoliko termograma ispitivanih površina. Na sljedećoj slici prikazan je termogram snimljen za vrijeme trajanja vremenskog intervala za koji su osrednjene izmjerene vrijednosti (od 49. do 78. točke mjerenja).



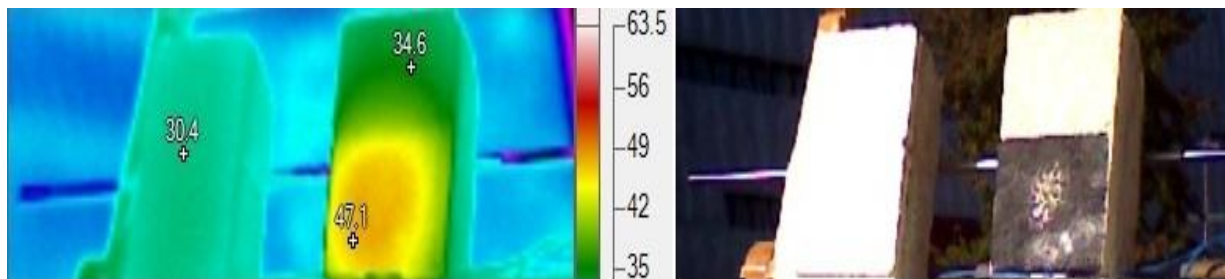
Slika 31. Površina premazana VR premazom i crna površina izložene Sunčevom zračenju (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje)

Prilikom analize termograma u računalnom programu Fluke SmartView 4.2, postavljen je emisijski faktor $\varepsilon = 0,9$. Vrijednost tog faktora određena je prvim mjerenjem unutar laboratorija. Prividna reflektirana temperatura postavljena je za 10 °C ispod temperature zraka izmjerene termoparovima u trenutku snimanja termograma. Bitni podaci za analizu ovog termograma su:

- termoparom izmjerena temperatura ploče s VR premazom 35,2 °C
- termoparom izmjerena temperatura crne ploče bez VR premaza 65,9 °C
- temperatura zraka u okolišu 23 °C
- prividna reflektirana temperatura (temperatura neba) 13 °C
- emisijski faktor dugovalnog zračenja za obje površine $\varepsilon = 0,9$
- greška termografske kamere +0,3 °C

Nakon unošenja navedenih podataka u računalni program za analizu termograma, na ekranu su prikazani iznosi temperatura dviju snimljenih površina. Oba prikazana iznosa veća su za 0,3 °C od onih izmjerenih termoparovima, što je vidljivo na Slici 31. Iz toga se može zaključiti da je emisijski faktor dugovalnog zračenja za obje površine točno određen te iznosi 0,9.

Temperatura ploča mjerena je i infracrvenim pirometrom. Usporedba dobivenih rezultata s onima dobivenim pomoću termoparova pokazala je da pirometar pokazuje otprilike 1 – 4 °C nižu temperaturu od one izmjerene termoparom. To predstavlja problem prilikom analize termograma snimljenih betonskih blokova. Osim toga, temperature betonskih blokova mjerene su s puno većim vremenskim intervalom od onog s kojim je akvizicijski sustav bilježio temperature metalnih ploča. Također, stacionarno stanje na betonskim blokovima ne postiže se u isto vrijeme kad i na metalnim pločama, zbog velike razlike u njihovim masama. Ipak, iz termograma na sljedećoj slici vidljivo je da je temperatura betonskog bloka premazanog VR premazom niža od temperature bloka crne i žute boje.



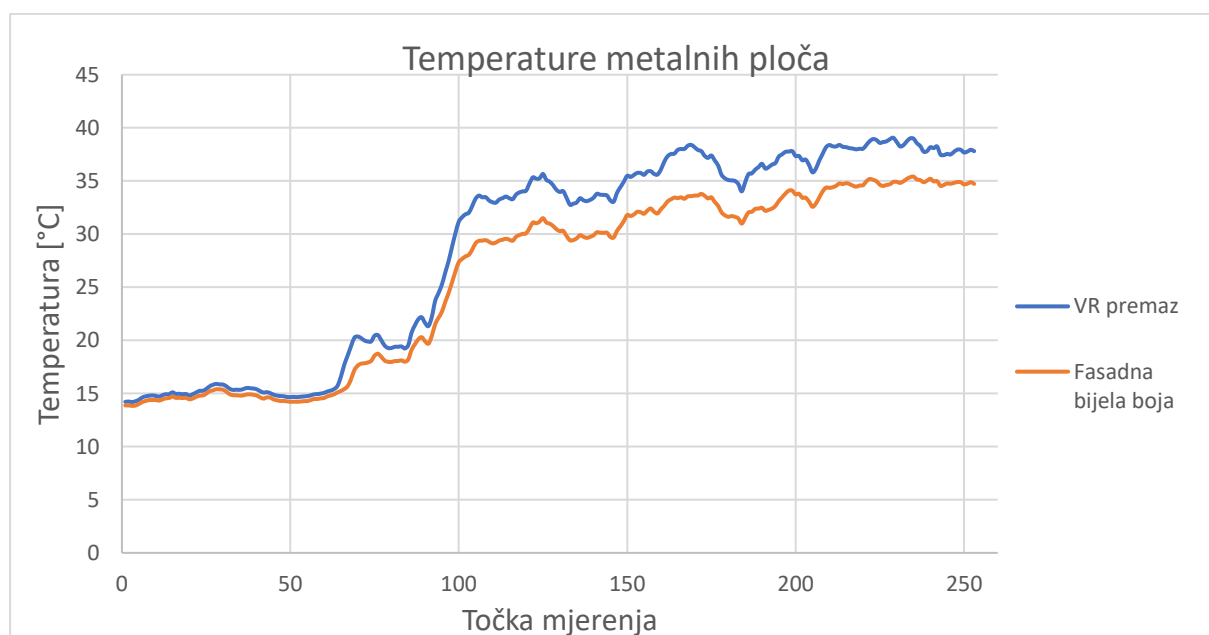
Slika 32. Betonski blokovi – lijevi s VR premazom, desni žute i crne boje površine (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje)

Kao i kod metalnih ploča, najnižu temperaturu površine ima betonski blok premazan VR premazom, dok najvišu temperaturu ima dio betonskog bloka crne boje.

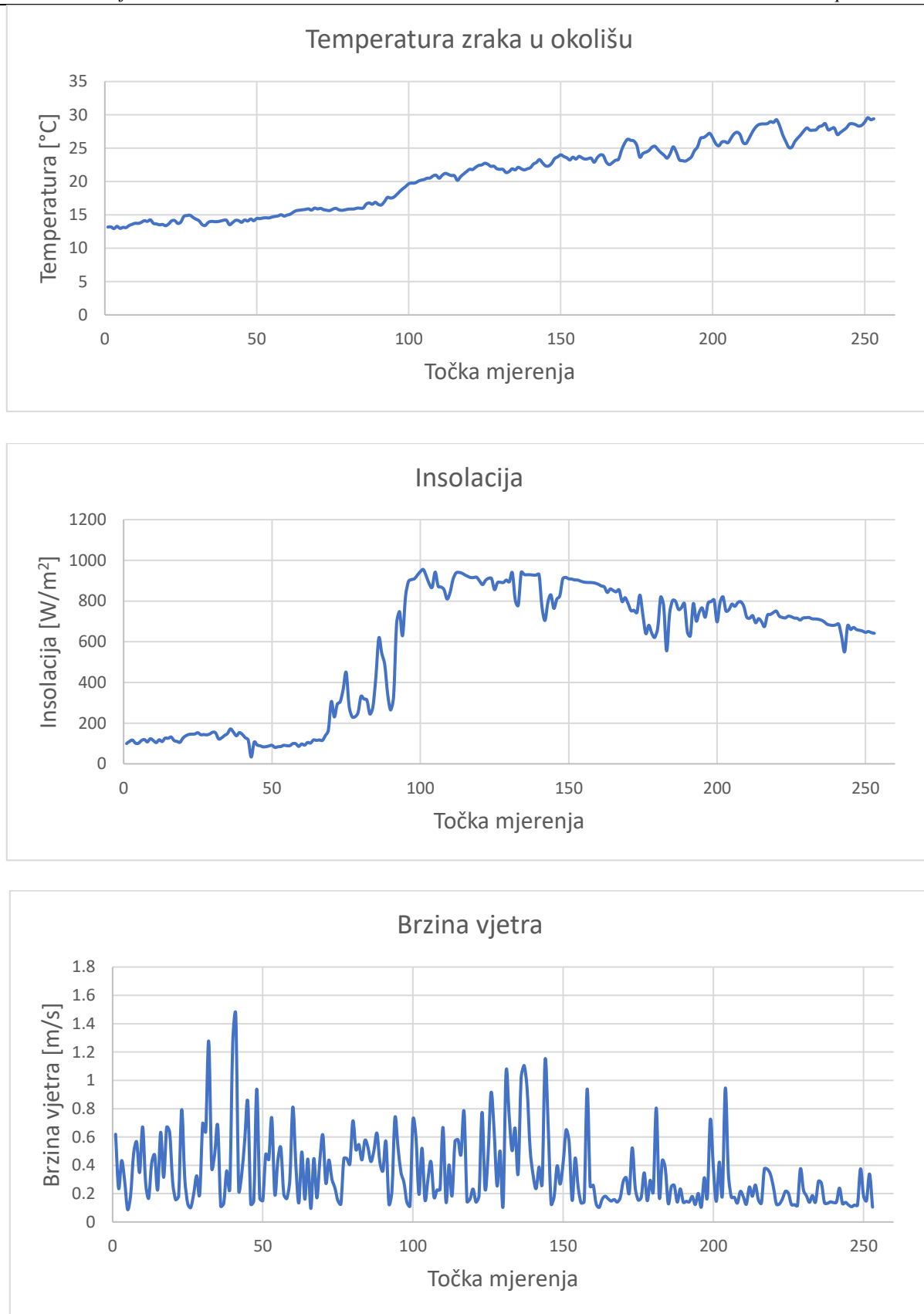
4.2.4.2. Mjerenje s pločom premazanom VR premazom i s pločom premazanom bijelom fasadnom bojom

Nakon mjerenja u kojem se uz ploču premazanu visokoreflektivnim premazom promatralo crnu ploču bez VR premaza, napravljeno je mjerenje u kojem je crna ploča zamijenjena pločom premazanom običnom bijelom fasadnom bojom. U Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 [6] navedeno je da svijetle fasadne boje imaju apsorpcijski faktor za kratkovalno (Sunčevo) zračenje jednak 0,4. Ovim se mjerenjem željelo prikupiti podatke potrebne za proračun tog apsorpcijskog faktora i usporediti izračunati faktor s onim navedenim u Algoritmu. Izabrana je najsvijetlija dostupna fasadna boja, odnosno potpuno bijela fasadna boja. Postupak mjerenja i mjerna oprema jednaki su kao u prethodnom mjerenju, a opisani su u poglavljima 4.2.2. i 4.2.3. Jedina razlika u mjernoj liniji je u tome da su ploča crne boje i betonski blok crne i žute boje zamijenjeni pločom i blokom bijele boje.

Dijagrami promjene temperature ispitivanih ploča te dijagrami promjene temperature okoliša, insolacije i vjetra prikazani su u nastavku.



Slika 33. Dijagram promjene temperature ploče bijele boje i ploče s VR premazom prilikom izlaganja Sunčevom zračenju



Slika 34. Dijagrami: a) temperatura zraka u okolišu; b) insolacija; c) brzina vjetra prilikom vanjskog mjerenja s pločama bijele i VR površine

Kao i u prethodnom mjerenju, za detaljniju analizu odabrani su prikupljeni podaci u intervalu u kojem je primijećena najizraženija stacionarnost insolacije i temperatura obiju ispitivanih površina. U ovom mjerenju radi se o intervalu od 150. do 160. točke mjerenja. Određena je srednja vrijednost za sve prikupljene podatke u odabranim točkama.

Tablica 8. Rezultati vanjskog mjerenja s pločama obične bijele i VR površine

Temperatura ploče s VR premazom	35,7 °C
Temperatura ploče obične bijele boje	32,04 °C
Temperatura zraka u okolišu	23,57 °C
Insolacija	896,22 W/m ²
Brzina vjetra	0,383 m/s

Iz vrijednosti dobivenih mjerenjem vidljivo je da se ploča premazana visokoreflektivnim premazom zagrijala na višu temperaturu od ploče premazane običnom bijelom fasadnom bojom. Već se iz te činjenice može pretpostaviti da je faktor apsorpcije kratkovalnog zračenja ispitivane obične bijele boje manji od apsorpcijskog faktora za kratkovalno zračenje VR premaza.

Pomoću vrijednosti izmjerene temperature zraka u okolišu određena je temperatura neba, umanjivanjem temperature zraka za 10 °C, odnosno:

$$\vartheta_{\text{nebo}} = \vartheta_{\text{ok}} - \Delta\vartheta_{\text{er}} = 23,57 - 10 = 13,57 \text{ °C} \quad (33)$$

Prije početka proračuna apsorpcijskog faktora za kratkovalno zračenje, potrebno je provesti proračun određivanja koeficijenta konvektivnog prijelaza topline, kao i u mjerenju s pločama crne i VR površine. Postupak ovog proračuna već je opisan u poglavlju 4.2.4.1.

Prvo su pomoću Toplinskih tablica [11] linearnom interpolacijom određena svojstva zraka za srednje temperature ploča u promatranom vremenskom intervalu (Tablica 9.), a zatim su izračunate sve potrebne bezdimenzijske značajke (Tablica 10.).

Tablica 9. Svojstva zraka (drugo vanjsko mjerenje)

	Uz ploču s VR premazom	Uz ploču obične bijele boje
Temperatura zraka, ϑ [°C]	35,7	32,04
Dinamička viskoznost, μ [Pa s]	$1,895 \cdot 10^{-5}$	$1,878 \cdot 10^{-5}$
Specifični toplinski kapacitet, c_p [J/(kg K)]	1007	1006,74
Toplinska provodnost, λ [W/(m K)]	0,02671	0,02645
Gustoća, ρ [kg/m ³]	1,128	1,142

Tablica 10. Bezdimenzijske značajke za zrak uz ploče obične bijele i VR površine

Bezdimenzijska značajka	Zrak uz ploču s VR premazom	Zrak uz ploču obične bijele boje
<i>Re</i>	4557	4653
<i>Pr</i>	0,7143	0,7148
<i>Gr</i>	11377481	8284281
<i>Ra</i>	8126404	5921266

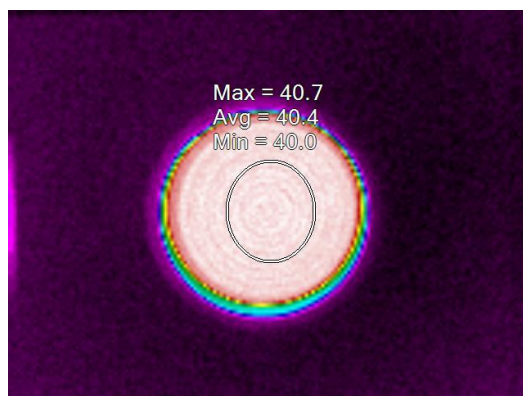
Nakon određivanja bezdimenzijskih značajki, izračunate su vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom prema 7 modela navedenih u jednadžbama (21) – (27). Izračunati koeficijenti prijelaza topline navedeni su u Tablici 11.

Tablica 11. Izračunati koeficijenti prijelaza topline uz ploče obične bijele i VR površine

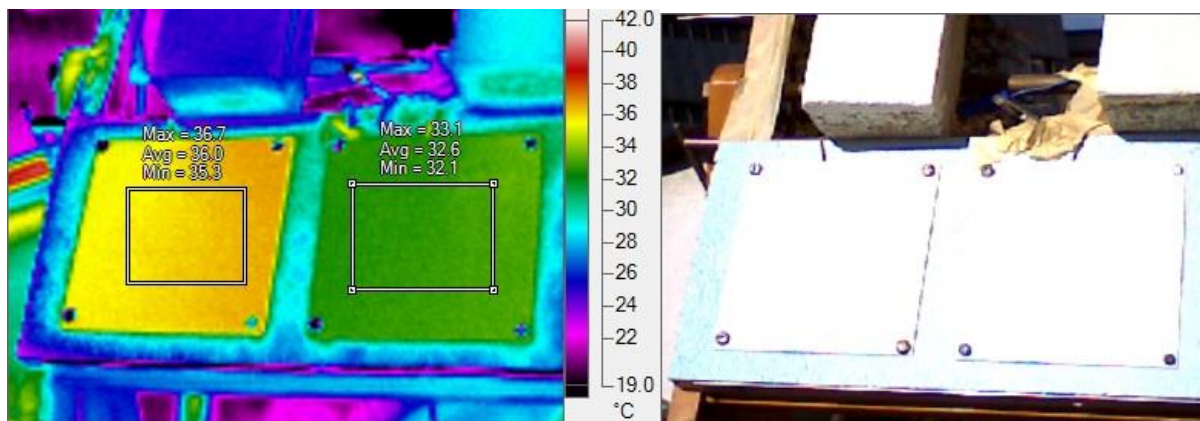
Izraz	α [W/(m ² K)] uz ploču s VR premazom	α [W/(m ² K)] uz ploču obične bijele boje
$Nu = 0,129 \cdot Ra^{\frac{1}{3}}$	3,46	3,09
$Nu = 0,48 \cdot Gr^{\frac{1}{4}}$	3,72	3,41
$Nu = 0,555 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}$	3,96	3,62
$Nu = 0,54 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}$	3,85	3,52
$Nu = 0,11 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} + Ra^{\frac{1}{10}}$	3,61	3,26
$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$	5,35	5,35
$\alpha = 5,7 + 3,8 \cdot w$	7,15	7,15

Koeficijent prijelaza topline izračunat prema izrazu za uvjete istovremene slobodne i prisilne konvekcije daje rezultate koji su najbliži očekivanima. Koeficijenti prijelaza topline izračunati prema izrazima za Nusseltov broj pri slobodnoj ili prisilnoj konvekciji imaju premale vrijednosti. Uzimajući u obzir naglu promjenjivost brzine vjetra, i u ovom se slučaju može pretpostaviti da je koeficijent konvektivnog prijelaza topline između površine ploče i okolišnjeg zraka tijekom mjerenja iznosio između 7 i 11 W/(m² K).

Napravljena je i analiza termograma snimljenih termografskom kamerom za vrijeme trajanja ovog mjerenja. Termografska kamera umjerena je pomoću kalibracijskog crnog tijela, čija je temperatura postavljena na 40 °C. Ustanovljena je greška termografske kamere +0,4 °C.

**Slika 35. Termogram kalibracijskog crnog tijela temperature 40 °C**

Tijekom mjerenja snimljeno je nekoliko termograma ispitivanih površina. Na sljedećoj slici prikazan je termogram snimljen za vrijeme trajanja vremenskog intervala za koji su osrednjene izmjerene vrijednosti (od 150. do 160. točke mjerenja). Lijeva ploča na slici premazana je VR premazom, dok je desna ploča premazana običnom bijelom bojom.



Slika 36. Površina premazana VR premazom i površina obične bijele boje izložene Sunčevom zračenju (lijevo: IC, desno: vidljivo zračenje)

Prividna reflektirana temperatura postavljena je za 10 °C ispod temperature zraka izmjerene termoparovima u trenutku snimanja termograma. Bitni podaci za analizu ovog termograma su:

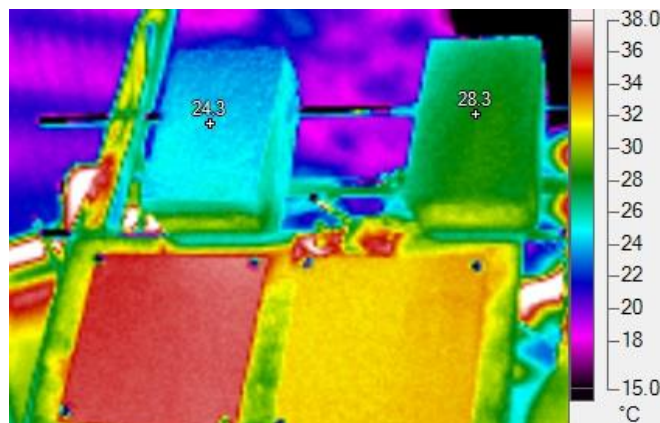
- termoparom izmjerena temperatura ploče s VR premazom 35,7 °C
- termoparom izmjerena temperatura ploče obične bijele boje 32,1 °C
- temperatura zraka u okolišu 23,7 °C
- prividna reflektirana temperatura (temperatura neba) 13,7 °C
- greška termografske kamere +0,4 °C

Analiza ovog termograma pokazuje da su emisijski faktori dugovalnog zračenja:

- 0,9 za ploču premazanu VR premazom
- 0,91 za ploču premazanu običnom bijelom bojom

Može se zaključiti da su emisijski faktori za dugovalno zračenje otprilike jednaki za obje površine te iznose 0,9, kao i za ranije ispitivanu površinu crne boje. Mala odstupanja emisijskog faktora mogu se pripisati netočnosti crnog tijela, nesavršenosti postupka određivanja prividne reflektirane temperature neba te činjenici da termogram nije snimljen u istoj sekundi u kojoj je akvizicijski sustav zabilježio temperature izmjerene termoparovima.

Snimljen je i termogram betonskih blokova, prikazan na Slici 37. Lijevi blok premazan je običnom bijelom bojom, dok je desni blok premazan visokoreflektivnim premazom za fasade. Iz termograma je vidljivo da je temperatura površine bloka obične bijele boje niža od temperature površine bloka premazanog visokoreflektivnim premazom.



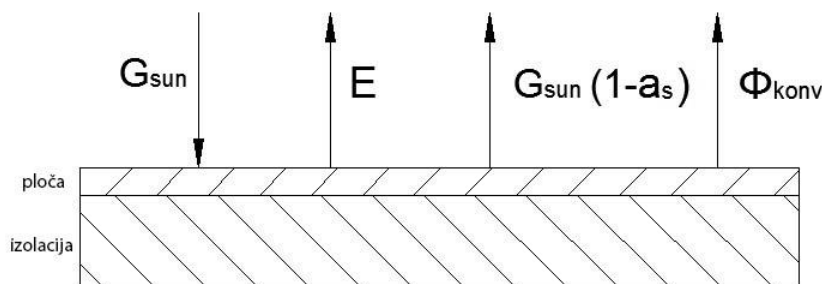
Slika 37. Termogram betonskih blokova premazanih običnom bijelom bojom (lijevo gore) i VR premazom (desno gore) izloženih Sunčevom zračenju

4.3. Matematički model za određivanje faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja

Prethodno opisana mjerenja provedena su kako bi se mogao odrediti faktor apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja. Proračun tog faktora moguće je napraviti za stacionarno stanje ispitivanih površina. Podaci potrebni za proračun su:

- temperatura površine
- temperatura zraka u okolišu
- insolacija
- koeficijent konvektivnog prijelaza topline
- emisijski faktor dugovalnog zračenja površine

Matematički model korišten za proračun faktora apsorpcije kratkovalnog zračenja definiran je jednadžbama (34), (35) i (36). a skica modela prikazana je na Slici 38.



Slika 38. Skica modela za proračun faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja

Na prikazanoj skici oznaka E predstavlja prijenos topline s površine ploče prema nebu, uzrokovan vlastitim emitiranim zračenjem površine, definiran jednadžbom:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{\text{nebo}}^4) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (34)$$

Prijelaz topline konvekcijom između površine ploče i zraka u okolišu definiran je jednadžbom:

$$\Phi_{\text{konv}} = \alpha_k \cdot (T - T_{\text{ok}}) \cdot A \quad (35)$$

Izraz za određivanje faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja može se dobiti postavljanjem bilance energije te jednostavnim sređivanjem. Izraz glasi:

$$a_s = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{\text{nebo}}^4) + \alpha_k \cdot (T - T_{\text{ok}})}{G_{\text{sun}}} \quad (36)$$

U proračunu je korišten koeficijent prijelaza topline konvekcijom određen postupkom opisanim u poglavlju 4.2.4.1. Napravljeni su proračuni faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za površine bez visokoreflektivnog premaza obične bijele i crne boje te dva proračuna za površinu premazanu visokoreflektivnim premazom, s obzirom da su provedena dva mjerenja uz izlaganje te površine Sunčevom zračenju. Ulazni podaci za proračun apsorpcijskog faktora navedenih površina nalaze se u Tablici 12.

Tablica 12. Ulazni podaci za proračun faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja

	Crna boja	VR premaz (prvo mjerenje)	Obična bijela boja	VR premaz (drugo mjerenje)
Temperatura površine, ϑ [°C]	65,12	34,79	32,04	35,70
Temperatura zraka, ϑ [°C]	22,65	22,65	23,57	23,57
Insolacija, G_{sun} [W/m ²]	808,37	808,37	896,22	896,22
Koeficijent prijelaza topline, α_k [W/(m ² K)]	7,19	7,19	7,15	7,15
Emisijski faktor dugovalnog zračenja, ε [-]	0,9	0,9	0,9	0,9

Uvrštavanjem ovih podataka u jednadžbu (36), uz pretpostavku da je prividna temperatura neba za 10 °C manja od izmjerene temperature zraka u okolišu, dobivaju se sljedeće vrijednosti faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za ispitivane površine:

Tablica 13. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja uz nekorrigirani koeficijent prijelaza topline

	Crna boja	VR premaz (prvo mjerenje)	Obična bijela boja	VR premaz (drugo mjerenje)
Faktor apsorpcije Sunčevog zračenja, a_s [-]	0,783	0,255	0,177	0,230

Napravljena je i dodatna analiza ovisnosti faktora apsorpcije o koeficijentu prijelaza topline te o pretpostavljenoj razlici između temperature zraka i prividne temperature neba. Zbog mogućnosti promjena koeficijenta prijelaza topline uzrokovanih naglim promjenama brzine vjetra tijekom vremenskog intervala za koji su osrednjene izmjerene vrijednosti, u analizi su

izračunati iznosi faktora apsorpcije Sunčevog zračenja za raspon koeficijenta prijelaza topline od 8 do 11 W/(m² K).

Tablica 14. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za različite vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i prividne temperature neba

α_k [W/(m ² K)]	$\Delta\theta_{er}$ [°C]	Crna boja	VR premaz (prvo mjerjenje)	Obična bijela boja	VR premaz (drugo mjerjenje)
8	6	0,802	0,243	0,163	0,22
8	8	0,814	0,255	0,174	0,231
8	10	0,826	0,267	0,185	0,242
8	12	0,838	0,279	0,195	0,252
9	6	0,854	0,258	0,172	0,233
9	8	0,867	0,27	0,183	0,244
9	10	0,879	0,282	0,194	0,255
9	12	0,89	0,294	0,205	0,266
10	6	0,907	0,273	0,182	0,247
10	8	0,919	0,285	0,193	0,258
10	10	0,931	0,297	0,204	0,269
10	12	0,943	0,309	0,214	0,279
11	6	0,96	0,288	0,191	0,26
11	8	0,97	0,3	0,202	0,271
11	10	0,984	0,312	0,213	0,282
11	12	0,995	0,324	0,224	0,293

Iz tablice je vidljiv znatan utjecaj koeficijenta prijelaza topline i razlike između temperature zraka i temperature neba. Prethodno izračunate vrijednosti koeficijenta konvektivnog prijelaza topline iznosile su 7,19 i 7,15 W/(m² K). Vrijednosti faktora apsorpcije za te iznose koeficijenta prijelaza topline iz Tablice 13. manje su od očekivanih. Jedan od mogućih razloga netočnosti određivanja faktora apsorpcije je činjenica da se u matematičkom modelu za proračun faktora apsorpcije kratkovalnog zračenja pretpostavlja savršena izolacija ispitivanih ploča. Također, prilikom mjerenja insolacije postoji utjecaj zračenja okolnih objekata, a koeficijent konvektivnog prijelaza topline promjenjiv je zbog promjena u brzini vjetera. Osim toga, izraz za

izračunavanje koeficijenta prijelaza topline pretpostavlja nastrujavanje zraka samo u jednom smjeru uzduž ploče, dok u stvarnom slučaju postoji mogućnost strujanja zraka uzduž ploče iz više smjerova. Zbog navedenih razloga, vrijednosti izračunatih koeficijenata prijelaza topline navedene u Tablici 12. mogu se korigirati, odnosno uvećati za procijenjenih 25 %. U tom se slučaju dobivaju vrijednosti 8,99 i 8,94 W/(m² K). Te su vrijednosti zaokružene na 9 W/(m² K) i unešene u model za izračunavanje faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja uz razliku temperature zraka u okolišu i temperature neba jednaku 10 °C. Ta vrijednost razlike temperatura izabrana je pošto se koristi u Algoritmu [6] te je u analizi termograma u poglavlju 4.2.4. pokazano da daje točne temperature površina ispitivanih ploča. Dobivene su sljedeće vrijednosti faktora apsorpcije:

Tablica 15. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja uz korigirani koeficijent prijelaza topline $a_s = 9 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

	Crna boja	VR premaz (prvo mjerjenje)	Obična bijela boja	VR premaz (drugo mjerjenje)
Faktor apsorpcije Sunčevog zračenja, a_s [-]	0,879	0,282	0,194	0,255

S obzirom da je visokoreflektivni premaz ispitivan u dva navrata te se vrijednosti njegovog faktora apsorpcije razlikuju za ta dva slučaja, izračunata je srednja vrijednost dvaju dobivenih faktora apsorpcije, a ona iznosi $a_s = 0,268$. Dakle, mjerenjima i naknadnom analizom i proračunom, određene su vrijednosti faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja za sve tri ispitivane površine. Te su vrijednosti navedene u Tablici 16.

Tablica 16. Faktori apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja

	Crna boja	Obična bijela boja	VR premaz
Faktor apsorpcije Sunčevog zračenja, a_s [-]	0,879	0,194	0,268

5. NUMERIČKI DIO

Nakon provedenih mjerenja dobiveni su podaci potrebni da bi se pristupilo proračunu potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje za proizvoljno odabrani model zgrade. Proračun je proveden u skladu sa smjernicama iz Priručnika za energetska certificiranje zgrada [1] te u skladu s Algoritmom za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 [6]. Proračun potrebne toplinske energije proveden je kako bi se procijenila isplativost korištenja visokoreflektivnog premaza za fasade, odnosno kako bi se odredile razlike u potrebnim energijama za grijanje i hlađenje u ovisnosti o faktoru apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja površina vanjskih zidova zgrade. Očekivan rezultat je smanjenje potrebne toplinske energije za hlađenje zgrade za niže vrijednosti faktora apsorpcije Sunčevog zračenja, uz istovremeno povećanje potrebne toplinske energije za grijanje zgrade.

S obzirom da faktor apsorpcije kratkovalnog zračenja vanjskih zidova nije jedini utjecajni faktor prilikom određivanja potrebne energije za grijanje i hlađenje, u ovom je poglavlju napravljen proračun kojim je ispitan utjecaj faktora apsorpcije za različite izvedbe građevnih dijelova zgrade. Prvenstveno, proračun je napravljen za tri različite nazivne razine potrebne specifične godišnje toplinske energije za grijanje svedene na korisnu površinu zgrade, u iznosima od:

- 10 kWh/m²a (dobro izolirana zgrada)
- 70 kWh/m²a (srednje izolirana zgrada)
- 150 kWh/m²a (slabo izolirana zgrada)

Prilikom proračuna mijenjane su vrsta i debljina izolacije zidova, stropa i poda te vrsta prozora pri faktoru apsorpcije kratkovalnog zračenja vanjskih zidova jednakom 0,4 kako bi se vrijednosti specifične potrebne godišnje toplinske energije za grijanje odabranog modela zgrade izjednačile s jednom od triju prethodno navedenih. Iznos faktor apsorpcije odabran je prema Algoritmu [6], u kojem je navedena vrijednost faktora apsorpcije za fasade svijetlih boja upravo jednaka 0,4.

Osim podataka o vrsti i svojstvima zgrade za koju se provodi proračun, važni su i meteorološki podaci, posebno podaci o temperaturi vanjskog zraka te o intenzitetu Sunčevog zračenja, koje prikuplja Državni hidrometeorološki zavod. Dva navedena meteorološka podatka jedini su

korišteni prilikom određivanja godišnje potrošnje energije prema normi HRN EN ISO 13790, dok za neke druge proračune mogu biti važni i podaci o vlažnosti vanjskog zraka, brzini vjetra i slično.

5.1. Norma HRN EN ISO 13790

Prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti (NN 97/14) [12], osnova proračuna godišnje potrebne toplinske energije za grijanje zgrade je norma HRN EN ISO 13790. Ta norma opisuje postupak proračuna godišnje potrošnje energije za grijanje i hlađenje stambenih i nestambenih zgrada ili njihovih dijelova. Norma i metodologija proračuna pomoću nje detaljno su opisane u Priručniku za energetske certificiranje zgrada [1]. Normom su obuhvaćeni:

- proračun izmjene topline transmisijom i ventilacijom u grijanom ili hlađenom dijelu zgrade, koji se grije ili hladi na konstantnu temperaturu
- proračun dobitaka topline od Sunčevog zračenja
- proračun utjecaja unutarnjih dobitaka topline
- proračun godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje (korisna energija)
- proračun konačne energije

Proračunu potrošnje energije za grijanje i hlađenje može se pristupiti na tri različita načina, s obzirom na vremenski korak proračuna. Tako se razlikuju:

- kvazistacionarni proračun na bazi sezonskih vrijednosti
- kvazistacionarni proračun na bazi mjesečnih vrijednosti
- dinamički proračun s vremenskim korakom od jednog sata ili kraćim

U ovom diplomskom radu za izračunavanje godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje korištena je metoda kvazistacionarnog proračuna na bazi mjesečnih vrijednosti. Tom metodom izračunavaju se potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje za svaki mjesec u godini te se naknadnim sumiranjem određuje ukupna godišnja potreba za toplinskom energijom.

Za proračun kvazistacionarnom mjesečnom metodom prema ovoj normi potrebno je poznavati ulazne podatke za proračun.

Potrebni meteorološki podaci su:

- prosječan mjesečni intenzitet Sunčevog zračenja na plohe različitog nagiba i orijentacije
- prosječna mjesečna temperatura vanjskog zraka

Potrebni podaci o dimenzijama i fizikalnim svojstvima zgrade:

- površine svih građevinskih dijelova
- neto površina poda kondicioniranih dijelova zgrade
- koeficijenti prolaza topline svih dijelova
- koeficijenti prolaza topline toplinskih mostova i duljine linijskih toplinskih mostova

Potrebni unutarnji projektni parametri:

- unutarnje projektne temperature za sve definirane zone
- broj izmjena zraka

Potrebni podaci o sustavima u zgradi:

- karakteristike sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i ostalih sustava u zgradi
- način korištenja i regulacija ugrađenih sustava
- karakteristike unutarnjih izvora topline

Nakon provođenja kompletnog proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje u skladu s normom HRN EN ISO 13790, dobivaju se izlazni podaci proračuna:

- ukupna izmijenjena toplota transmisijom
- ukupna izmijenjena toplota ventilacijom
- ukupni unutarnji toplinski dobici
- ukupni dobici topline Sunčevim zračenjem
- potrebna korisna energija za grijanje i hlađenje

Korištenjem izraza iz Algoritma za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade [13] i iz Algoritma za proračun sustava grijanja i pripreme PTV-a [14], u skladu s normom HRN EN 15316, moguće je iz dobivenih podataka o potrebnoj korisnoj energiji izračunati i količine isporučene i primarne energije. Prilikom izračuna isporučene energije uzimaju se u obzir gubici sustava grijanja i hlađenja, poput gubitaka u sustavu proizvodnje, razvoda i predaje, zbog kojih je zgradi potrebno dovesti veću količinu energije od one koja je stvarno utrošena za grijanje ili hlađenje unutarnjih prostora zgrade.

5.2. Model zgrade

Zamišljena zgrada za koju se provodi proračun prizemna je obiteljska kuća pravokutnog oblika tlocrta, uz vanjske dimenzije zidova 10 x 9 metara. Visina etaže do stropa koji odvaja kondicionirani prostor od tavanskog prostora je 3 metra. Kuća je pokrivena crijepom, na krovu nagiba 30°. Analizirana su dva različita slučaja s obzirom na dimenzije otvora (prozora) u zidovima. U prvom slučaju površine prozora su 5 m² na svakom vanjskom zidu, dok su u drugom slučaju prozori dvostruko veći te im površine iznose 10 m². Raspored unutarnjih zidova nije razmatran i nije uzet u obzir. Napravljena je analiza za različite razine izolacije kuće, mijenjanjem dimenzija i vrste izolacijskih slojeva u zidovima, podu i stropu, uz zadržavanje vanjskih dimenzija kuće konstantnima. Analiza je provedena za dva različita skupa referentnih klimatskih podataka iz [6], i to za kontinentalnu (Zagreb) i primorsku Hrvatsku (Split). U nastavku su definirani glavni elementi kuće te su posebno navedene dimenzije i vrsta izolacijskih slojeva za svaki promatrani slučaj.

Tablica 17. Površine građevnih dijelova kuće

Građevni dio	Površina A_k [m ²]
Vanjski zid (sjever)	39,43 za prozor površine 5 m ² (34,43 u slučaju prozora površine 10 m ²)
Vanjski zid (istok)	22 (17)
Vanjski zid (jug)	39,43 (34,43)
Vanjski zid (zapad)	22 (17)
Pod na tlu	90
Strop	90

S obzirom da se strop s izolacijskim slojem nalazi na visini od 3 m iznad poda, kondicionirana zona za koju se provodi proračun ne uključuje cijelu površinu zidova sa sjeverne i južne strane zgrade. U proračun se uzimaju samo dijelovi zida do visine stropa. Stoga su površine građevnih dijelova koji razdvajaju kondicioniranu zonu od tavanskog prostora i okoliša sljedeće:

Tablica 18. Površine građevnih dijelova koji omeđuju kondicionirani prostor kuće

Građevni dio	Površina A_k [m ²]
Vanjski zid (sjever)	25 za prozor površine 5 m ² (20 u slučaju prozora površine 10 m ²)
Vanjski zid (istok)	22 (17)
Vanjski zid (jug)	25 (20)
Vanjski zid (zapad)	22 (17)
Pod na tlu	90
Strop	90

U nastavku su nabrojani slojevi građevnih dijelova kuće te su navedene debljina, toplinska provodnost i gustoća svakog pojedinog sloja. Posebno su označeni termoizolacijski slojevi čije su dimenzije mijenjane u svrhu provedbe proračuna za različite razine godišnje potrebne toplinske energije. Ti su slojevi naknadno istaknuti u Tablicama 22. – 27..

Tablica 19. Građevni slojevi vanjskih zidova (svojstva materijala prema [6])

Sloj	Materijal	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
1	Vapneno-cementna žbuka	0,002	1	1800
2	Šuplji blokovi od gline	0,25	0,48	1100
3	Polimerno-cementno ljepilo	0,005	0,9	1650
4	Termoizolacijski materijal (Tablice 22. i 25.)	Tablice 22. i 25.	Tablice 22. i 25.	Tablice 22. i 25.
5	Polimerno-cementno ljepilo	0,005	0,9	1650
6	Silikatna žbuka	0,002	0,9	1800

Tablica 20. Građevni slojevi poda na tlu (svojstva materijala prema [6])

Sloj	Materijal	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
1	Cementni estrih	0,05	1,6	2000
2	Termoizolacijski materijal (Tablice 23. i 26.)	Tablice 23. i 26.	Tablice 23. i 26.	Tablice 23. i 26.
3	Armirani beton	0,1	2,6	2500
4	Beton	0,1	2	2400
5	Šljunak	0,3	0,81	1700

Tablica 21. Građevni slojevi stropa (svojstva materijala prema [6])

Sloj	Materijal	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
1	Vapneno-cementna žbuka	0,002	1	1800
2	Armirani beton	0,1	2,6	2500
3	Mineralna vuna (MW)	Tablice 24. i 27.	0,04	105

Debljine termoizolacijskih slojeva određene su korištenjem alata *Solver* u računalnom programu Microsoft Excel, uz postavljeni faktor apsorpcije Sunčevog zračenja vanjskih zidova jednak 0,4. Dobiveni rezultati potrebnih debljina slojeva u Tablicama 22. – 27. zaokruženi su na četvrtu decimalu. Za kontinentalnu Hrvatsku nije napravljena analiza za razinu specifične godišnje potrebne toplinske energije u iznosu 10 kWh/m²a, pošto se nije uspjelo dobiti realne dimenzije izolacijskih slojeva koji bi ostvarili tu razinu godišnje potrebne toplinske energije za promatrani model kuće. Korisna površina A_K kuće mijenja se ovisno o debljini izolacije u vanjskim zidovima, s obzirom da se ukupna debljina zidova mijenja uz zadržavanje konstantnih vanjskih dimenzija kuće 10 m x 9 m.

Tablica 22. Termoizolacijski sloj u vanjskom zidu za promatrane modele kuće za lokaciju u kontinentalnoj Hrvatskoj (Zagreb) (svojstva materijala prema [6])

Površina prozora na svakom zidu [m ²]	$Q'_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	Materijal termoizolacijskog sloja	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
5	70	Ekspandirani polistiren (EPS)	0,1123	0,04	20
5	150	EPS	0,008	0,04	20
10	70	EPS	0,1071	0,04	20
10	150	EPS	0	0,04	20

Tablica 23. Termoizolacijski sloj u podu na tlu za promatrane modele kuće za lokaciju u kontinentalnoj Hrvatskoj (Zagreb) (svojstva materijala prema [6])

Površina prozora na svakom zidu [m ²]	$Q'_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	Materijal termoizolacijskog sloja	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
5	70	Ekspandirani polistiren (EPS)	0,2	0,04	20
5	150	EPS	0,08	0,04	20
10	70	EPS	0,2	0,04	20
10	150	EPS	0,08	0,04	20

Tablica 24. Termoizolacijski sloj u stropu za promatrane modele kuće za lokaciju u kontinentalnoj Hrvatskoj (Zagreb) (svojstva materijala prema [6])

Površina prozora na svakom zidu [m ²]	$Q'_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	Materijal termoizolacijskog sloja	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
5	70	Mineralna vuna (MW)	0,2	0,04	20
5	150	MW	0,1	0,04	20
10	70	MW	0,2	0,04	20
10	150	MW	0,0859	0,04	20

Tablica 25. Termoizolacijski sloj u vanjskom zidu za promatrane modele kuće za lokaciju u primorskoj Hrvatskoj (Split) (svojstva materijala prema [6])

Površina prozora na svakom zidu [m ²]	$Q'_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	Materijal termoizolacijskog sloja	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
5	10	Tvrda poliuretanska pjena (PUR)	0,15	0,02	30
5	70	EPS	0,1	0,04	20
5	150	EPS	0	0,04	20
10	10	PUR	0,15	0,02	30
10	70	EPS	0,1	0,04	20
10	150	EPS	0	0,04	20

Tablica 26. Termoisolacijski sloj u podu na tlu za promatrane modele kuće za lokaciju u primorskoj Hrvatskoj (Split) (svojstva materijala prema [6])

Površina prozora na svakom zidu [m ²]	$Q'_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	Materijal termoizolacijskog sloja	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
5	10	Tvrda poliuretanska pjena (PUR)	0,3	0,02	30
5	70	Ekspandirani polistiren (EPS)	0,08	0,04	20
5	150	EPS	0	0,04	20
10	10	PUR	0,3	0,02	30
10	70	EPS	0,0348	0,04	20
10	150	EPS	0	0,04	20

Tablica 27. Termoisolacijski sloj u stropu za promatrane modele kuće za lokaciju u primorskoj Hrvatskoj (Split) (svojstva materijala prema [6])

Površina prozora na svakom zidu [m ²]	$Q'_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	Materijal termoizolacijskog sloja	d [m]	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]
5	10	Mineralna vuna (MW)	0,3959	0,04	20
5	70	MW	0,0271	0,04	20
5	150	MW	0,0234	0,04	20
10	10	MW	0,1713	0,04	20
10	70	MW	0,02	0,04	20
10	150	MW	0,0095	0,04	20

Za prozirne građevne dijelove (prozore) uzeti su prozori prema [6] koji su napravljeni od dvostrukog izolacijskog stakla s plinovitim punjenjem, LowE premazom i trostrukim brtvljenjem, uz metalni okvir s prekinutim toplinskim mostom. Koeficijent prolaza topline takvih prozora iznosi

$$U_{win} = 1,7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}.$$

Jedina dva modela kuće za koje se ne uzima takva vrsta prozora su modeli kuće s potrebnom godišnjom toplinskom energijom za grijanje u iznosu od 10 kWh/m² čiji je proračun proveden uz meteorološke podatke za primorsku Hrvatsku, za obje površine prozora (5 i 10 m²). Za te su modele izabrani prozori koji se sastoje od dvostrukog izolacijskog stakla s plinovitim punjenjem, LowE premazom, trostrukim brtvljenjem i PVC okvirom, prema [6]. Koeficijent prolaza topline ovih prozora iznosi

$$U_{\text{win}} = 1,4 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}.$$

Bruto volumen kondicioniranog dijela zgrade iznosi:

$$V_e = 270 \text{ m}^3$$

Neto volumen kondicioniranog dijela zgrade, prema [6] izračunava se iz izraza (37), koji vrijedi za zgrade do tri etaže.

$$V = 0,76 \cdot V_e \quad (37)$$

Neto volumen prema tome iznosi:

$$V = 205,2 \text{ m}^3$$

5.3. Proračunski parametri

Za sve navedene modele zgrade napravljena je usporedba potrebne toplinske energije za tri faktora apsorpcije:

- $a_s = 0,4$ (svijetla boja zida prema [6])
- $a_s = 0,268$ (visokoreflektivni premaz, Tablica 16.)
- $a_s = 0,194$ (ispitivana obična bijela fasadna boja, Tablica 16.)

Unutarnje proračunske temperature kondicionirane zone odabrane su za obiteljsku kuću prema [6] te iznose:

- 20 °C u sezoni grijanja za obje odabrane lokacije kuće (zimski mjeseci: siječanj, veljača, ožujak, travanj, listopad, studeni, prosinac)
- 22 °C u sezoni hlađenja za kontinentalnu Hrvatsku (ljetni mjeseci: svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz, rujan)
- 24 °C u sezoni hlađenja za primorsku Hrvatsku

Klimatski podaci o prosječnim mjesečnim temperaturama zraka i Sunčevom zračenju na vertikalnu plohu za 4 glavne strane svijeta (sjever (S), istok (I), zapad (Z) i jug (J)) preuzeti su iz [6] te su navedeni u Tablici 28.

Tablica 28. Referentni klimatski podaci [6]

Mjesec	Kontinentalna Hrvatska (Zagreb)					Primorska Hrvatska (Split)				
	Temp.	Sunčevo zračenje [MJ/m ²]				Temp.	Sunčevo zračenje [MJ/m ²]			
	$\vartheta_{e,m}$ [°C]	S	I	Z	J	$\vartheta_{e,m}$ [°C]	S	I	Z	J
1	-0,6	51	85	85	157	6,6	64	144	144	309
2	2,2	72	128	128	208	7,5	81	205	205	371
3	6,5	126	241	241	310	9,9	133	317	317	419
4	11,2	163	311	311	301	13,4	167	383	383	361
5	15,9	208	398	398	316	18	208	452	452	337
6	19,2	214	418	418	301	21,6	212	477	477	316
7	21,1	214	439	439	325	24,5	210	500	500	341
8	20,1	186	385	385	339	24	186	444	444	376
9	16,4	136	305	305	359	20,5	139	363	363	426
10	11,1	96	200	200	317	16,2	103	287	287	485
11	5,6	55	92	92	164	11,6	67	163	163	342
12	0,9	41	62	62	116	7,9	56	126	126	289
God.	10,8	1563	3064	3064	3213	15,1	1625	3861	3861	4373

5.4. Proračun godišnje potrebne toplinske energije za grijanje $Q_{H,nd}$

Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje računski je određena količina topline koju sustavom grijanja treba dovesti u zgradu za održavanje unutarnje proračunske temperature tijekom razdoblja grijanja zgrade. Proračun je proveden kvazistacionarnom mjesečnom metodom, prema [6], u skladu s normom HRN EN ISO 13790. Potrebna toplinska energija za grijanje izračunata je za svaki mjesec u godini, a zatim su dobivene vrijednosti sumirane kako bi se odredila ukupna godišnja potrebna toplinska energija za grijanje.

Potrebna toplinska energija za grijanje računa se pomoću izraza (38).

$$Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (38)$$

Ukupni toplinski dobici zgrade sastoje se od unutarnjih i solarnih dobitaka, dok se ukupno izmijenjena toplinska energija između zgrade i njenog okoliša sastoji od toplinske energije izmijenjene transmisijom i toplinske energije izmijenjene ventilacijom. Prema tome, izraz (38) može se napisati i u sljedećem obliku:

$$Q_{H,nd,cont} = Q_{Tr} + Q_{Ve} - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (39)$$

Napravljen je proračun svakog člana s desne strane jednadžbe (39). U nastavku je prikazan postupak proračuna uz navođenje rezultata za kuću u kontinentalnoj Hrvatskoj, razine izolacije kojom se postiže specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje u iznosu od 70 kWh/m²a, uz postojanje prozora površine 5 m² na svakoj strani kuće i s faktorom apsorpcije Sunčevog zračenja vanjskih zidova $a_s = 0,4$.

5.4.1. Toplinska energija izmijenjena transmisijom

Kako bi se izračunala toplinska energija izmijenjena transmisijom, najprije je potrebno odrediti koeficijent transmisijske toplinske izmjene topline, H_{Tr} . Taj se koeficijent računa pomoću izraza (40).

$$H_{Tr} = H_D + H_U + H_A + H_{g,m} \quad (40)$$

Prethodna jednadžba pokazuje da se ukupni koeficijent transmisijske izmjene topline dobiva sumiranjem koeficijenata transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu kroz grijani (H_D) i negrijani prostor (H_U), koeficijenta transmisijske izmjene topline prema susjednoj zgradi H_A te prema tlu za proračunski mjesec $H_{g,m}$. Za odabrane modele kuće smatra se da susjedne zgrade ne postoje te da se u kući ne nalaze negrijani prostori. Jedini negrijani prostor u kući je tavanski prostor, što se uzima u obzir prilikom određivanja koeficijenta prolaza topline kroz krov. Prema tome:

$$H_U = H_A = 0 \quad (41)$$

Ukupna količina topline izmijenjene transmisijom računa se iz sljedeće jednadžbe:

$$Q_{Tr} = \frac{H_{Tr}}{1000} (\vartheta_{int,H} - \vartheta_e) \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (42)$$

5.4.1.1. Transmisijaska izmjena topline od grijanog prostora prema okolišu

Koeficijent transmisijске izmjene topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu može se izračunati prema jednoj od sljedeće dvije jednađbe:

$$H_D = \sum_k A_k \cdot U_k + \sum_l \psi_l \cdot l_l + \sum_j \chi_j \quad (43)$$

$$H_D = \sum_k A_k \cdot (U_k + \Delta U_{TM}) \quad (44)$$

Jednađba (43) koristi se uz poznate vrste i duljine linijskih toplinskih mostova te koeficijente prolaza topline točkastih toplinskih mostova. S obzirom da su analizirani jednostavni modeli zgrada u kojima nisu definirani toplinski mostovi, za proračun koeficijenta H_D iskorištena je jednađba (44) u kojoj se javlja dodatak na koeficijent prolaza topline zbog postojanja toplinskih mostova ΔU_{TM} . Uzet je dodatak za toplinske mostove projektirane u skladu s katalogom dobrih rješenja toplinskih mostova, koji iznosi:

$$\Delta U_{TM} = 0,05 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}.$$

Koeficijent prolaza topline vanjskog zida izračunat je sljedećom jednađbom:

$$U_{\text{zid}} = \frac{1}{R_{Si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{Se}} \quad (45)$$

Članovi u nazivniku jednađbe (45) predstavljaju toplinske otpore. Članovi s indeksima od 1 do n predstavljaju vrijednosti toplinskih otpora svih pojedinih građevnih slojeva vanjskog zida, dok prvi i zadnji član u nazivniku predstavljaju unutarnji i vanjski plošni otpor prijelaza topline. Prema [6], vrijednosti tih dvaju članova za vodoravni smjer toplinskog toka kroz vanjske zidove iznose:

$$R_{Si} = 0,13 \text{ (m}^2 \text{ K)/W};$$

$$R_{Se} = 0,04 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}.$$

Toplinski otpor svakog sloja građevnih dijelova zgrade može se odrediti iz omjera debljine i toplinske provodnosti sloja navedenih u Tablicama 19. – 27., odnosno:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (46)$$

Prema tome, koeficijent prolaza topline vanjskih zidova za model zgrade odabran za prikaz rezultata pojedinih koraka proračuna iznosi:

$$U_{\text{zid}} = 0,285 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}).$$

Koeficijent prolaza topline kroz prozore naveden je u opisu modela zgrada u poglavlju 5.2. te za odabrani model zgrade iznosi:

$$U_{\text{win}} = 1,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}).$$

Koeficijent prolaza topline kroz strop određuje se na sličan način kao koeficijent prolaza topline kroz vanjske zidove, uz tretiranje negrijanog tavanskog prostora kao dodatnog toplinskog otpora. Toplinski otpor tavanskog prostora uz pokrov crijepom bez krovne ljepenke prema [6] iznosi:

$$R_u = 0,06 (\text{m}^2 \text{ K})/\text{W}.$$

Unutarnji plošni otpor za smjer toplinskog toka prema gore iznosi

$$R_{\text{Si}} = 0,1 (\text{m}^2 \text{ K})/\text{W}.$$

Koeficijent prolaza topline krova izračunat je jednadžbom (47):

$$U_{\text{strop}} = \frac{1}{R_{\text{Si}} + R_u + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{\text{Se}}} \quad (47)$$

Koeficijent prolaza topline kroz strop za odabrani model iznosi:

$$U_{\text{strop}} = 0,191 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}).$$

Uz poznate koeficijente prolaza topline vanjskih zidova, prozora i stropa te uz poznavanje ploštine njihovih površina navedenih u Tablici 18., pomoću jednadžbe (48) određen je koeficijent transmisijske izmjene topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu.

$$H_D = A_{\text{zid}} \cdot (U_{\text{zid}} + \Delta U_{\text{TM}}) + A_{\text{win}} \cdot U_{\text{win}} + A_{\text{strop}} \cdot (U_{\text{strop}} + \Delta U_{\text{TM}}) = 87,119 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (48)$$

5.4.1.2. Transmisijaska izmjena topline prema tlu

Prilikom proračuna transmisijске izmjene topline prema tlu, u obzir se uzima toplinska tromost tla te se koeficijent transmisijске izmjene topline prema tlu računa za svaki mjesec posebno, prema [6]. Izraz za njegovo izračunavanje glasi:

$$H_{g,m} = \frac{\Phi_m}{\vartheta_{\text{int},m} - \vartheta_{e,m}} \quad (49)$$

Član u brojniku prethodnog izraza predstavlja toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec, kojeg se može izračunati jednadžbom (50).

$$\Phi_m = H_g(\bar{\vartheta}_{\text{int}} - \bar{\vartheta}_e) - H_{\text{pi}}(\bar{\vartheta}_{\text{int}} - \vartheta_{\text{int},m}) + H_{\text{pe}}(\bar{\vartheta}_e - \vartheta_{e,m}) \quad (50)$$

U jednadžbi (50) oznaka H_g odnosi se na stacionarni koeficijent transmisijске izmjene topline prema tlu, koji se računa jednadžbom (51).

$$H_g = A_g \cdot U + P \cdot \psi_g \quad (51)$$

Zbog već spomenutog nepoznavanja točnog iznosa duljinskog koeficijenta prolaza topline za toplinski most na spoju zida i poda, jednadžba (51) korigirana je na način da se koeficijentu prolaza topline U pribroji dodatak zbog postojanja toplinskih mostova ΔU_{TM} , kao u jednadžbi (44). Na taj je način dobiven korigirani izraz za izračun stacionarnog koeficijenta transmisijске izmjene topline prema tlu.

$$H_g = A_g \cdot (U + \Delta U_{\text{TM}}) \quad (52)$$

Kako bi se odredio koeficijent prolaza topline kroz pod na tlu, određeno je nekoliko pomoćnih vrijednosti. Oznaka P u jednadžbi (51) predstavlja izloženi opseg poda, odnosno ukupnu duljinu vanjskih zidova koji odvajaju grijani prostor od vanjskog okoliša. Za analizirane modele kuće izloženi opseg poda iznosi

$$P = 2 \cdot (10 + 9) = 38 \text{ m} \quad (53)$$

Nakon određivanja izloženog opsega poda izračunata je karakteristična dimenzija poda B' prema jednadžbi (54).

$$B' = \frac{A_g}{0,5 \cdot P} = \frac{90}{0,5 \cdot 38} = 4,737 \text{ m} \quad (54)$$

Koeficijent prolaza topline kroz pod na tlu ovisi o ekvivalentnoj debljini poda d_t . Od građevnih slojeva koji sačinjavaju pod (Tablica 20.), u proračunu se uzima u obzir samo toplinski otpor

termoizolacijskog sloja, pošto se taj sloj postavlja iznad hidroizolacijskog sloja. Naime, u građevnim slojevima ispod hidroizolacijskog sloja može se nakupiti vlaga iz okolnog tla, što utječe na toplinsku provodnost tih slojeva. Kada bi se u proračunu transmisije topline kroz tlo uzimali u obzir i ti slojevi, proračun bi bio upitne točnosti. Ekvivalentna debljina poda računa se iz sljedeće jednadžbe:

$$d_t = w + \lambda \cdot (R_{Si} + R_f + R_{Se}) \quad (55)$$

Uzima se da je koeficijent toplinske provodnosti tla jednak:

$$\lambda = 2 \text{ W/(m K)}.$$

Plošni toplinski otpori za pod na tlu iznose:

$$R_{Si} = 0,17 \text{ (m}^2 \text{ K)/W};$$

$$R_{Se} = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}.$$

Toplinski otpor konstrukcije poda računa se kao omjer debljine i toplinske provodnosti termoizolacijskog materijala, u promatranom slučaju, ekspaniranog polistirena debljine 20 cm i toplinske provodnosti 0,04 W/(m K), Tablica 23. Oznaka w u jednadžbi (55) predstavlja debljinu vanjskog zida, koja se dobiva zbrajanjem debljina svih njegovih građevnih slojeva. Izračunata je ekvivalentna debljina poda:

$$d_t = 10,716 \text{ m}.$$

Koeficijent prolaza topline za pod na tlu računa se prema jednoj od dvije sljedeće jednadžbe, ovisno o odnosu ekvivalentne debljine poda d_t i karakteristične dimenzije poda B' .

Ako je $d_t < B'$, koristi se jednadžba (56).

$$U_{\text{pod}} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_t} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B'}{d_t} + 1 \right) \quad (56)$$

U slučaju da je $d_t \geq B'$, koristi se jednadžba (57).

$$U_{\text{pod}} = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t} \quad (57)$$

U promatranom je slučaju $d_t \geq B'$ pa je dobivena vrijednost koeficijenta prolaza topline jednaka:

$$U_{\text{pod}} = 0,155 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}.$$

Kako bi se izračunala vrijednost toplinskog tok izmjene topline s tlom, određeni su unutarnji (H_{pi}) i vanjski periodički koeficijent transmisije izmjene topline (H_{pe}), prema jednadžbama (58) i (59).

$$H_{pi} = A_g \frac{\lambda}{d_t} \cdot \sqrt{\frac{2}{(1 + \delta/d_t)^2 + 1}} \quad (58)$$

$$H_{pe} = 0,37 \cdot P \cdot \lambda \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_t} + 1\right) \quad (59)$$

U prethodne dvije jednadžbe oznaka δ predstavlja periodičku dubinu prodiranja, koja ovisi o vrsti tla. Za sve analizirane modele kuće odabrano je tlo sačinjeno od pijeska ili šljunka, čija je periodička dubina prodiranja [6]:

$$\delta = 3,2 \text{ m.}$$

Za promatrani model kuće izračunate su vrijednosti periodičkih koeficijenata transmisije izmjene topline za pod na tlu:

$$H_{pi} = 14,49 \text{ W/K;}$$

$$H_{pe} = 7,35 \text{ W/K.}$$

Nakon određivanja svih navedenih pomoćnih vrijednosti, jednadžbom (52) izračunato je da stacionarni koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu iznosi:

$$H_g = 18,474 \text{ W/K.}$$

Jednadžbom (50) izračunate su vrijednosti toplinskog toka izmjene topline s tlom za svaki mjesec, a jednadžbom (49) izračunati su koeficijenti transmisije izmjene topline prema tlu. Korištenjem jednadžbe (40) određeni su koeficijenti transmisije izmjene topline za svaki mjesec u godini, a iz (42) ukupna količina topline izmijenjene transmisijom. Rezultati su prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 29. Toplina izmijenjena transmisijom (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m², srednja razina toplinske izolacije)

Mjesec	Φ_m [W]	$H_{g,m}$ [W/K]	H_{Tr} [W/K]	Q_{Tr} [kWh]
1	257,04	12,478	99,60	1526,46
2	236,47	13,285	100,40	1200,99
3	204,87	15,176	102,29	1027,45
4	170,34	19,357	106,48	674,63
5	164,79	27,015	114,13	517,99
6	140,54	50,194	137,31	276,82
7	126,58	140,649	227,77	152,51
8	133,93	70,490	157,61	222,80
9	161,12	28,771	115,89	467,27
10	171,07	19,222	106,34	704,15
11	211,49	14,687	101,81	1055,52
12	246,02	12,881	100	1421,04

5.4.2. Toplinska energija izmijenjena ventilacijom

Osnovni izrazi za proračun potrebne toplinske energije za ventilaciju dani su u [6] i [13]. Potrebna toplinska energija za ventilaciju i klimatizaciju zgrade u periodu grijanja može se izraziti jednadžbama (60) i (61).

$$Q_{H,ve} = Q_{ve,inf} + Q_{ve,win} + Q_{H,ve,mech} \quad (60)$$

$$Q_{H,ve} = \frac{H_{H,ve} \cdot (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e)}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (61)$$

Koeficijent ventilacijske izmjene topline u periodu grijanja $H_{H,ve}$ suma je koeficijenata ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije $H_{ve,inf}$, uslijed otvaranja prozora (prozračivanja) $H_{ve,win}$ i uslijed mehaničke ventilacije prilikom zagrijavanja zraka $H_{H,ve,mech}$. Dakle, koeficijent ventilacijske izmjene topline izražava se sljedećom jednadžbom:

$$H_{H,ve} = H_{ve,inf} + H_{ve,win} + H_{H,ve,mech} \quad (62)$$

Nijedan od analiziranih modela zgrade nema mehaničku ventilaciju, tako da se posljednji član s desne strane jednadžbi (60) i (62) može zanemariti.

Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije ovisi o broju izmjena zraka u kondicioniranoj zoni, n_{inf} [h^{-1}]. Također, postoji ovisnost i o volumenu zraka u zoni, koji je naveden kao neto volumen zone u poglavlju 5.2. te iznosi $205,2 \text{ m}^3$. Izraz za proračunavanje koeficijenta ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije glasi:

$$H_{\text{Ve,inf}} = \frac{n_{\text{inf}} \cdot V \cdot \rho_a \cdot c_{\text{p,a}}}{3600} \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right] \quad (63)$$

Za gustoću zraka ρ_a uzima se vrijednost $1,2 \text{ kg/m}^3$, dok se za specifični toplinski kapacitet zraka $c_{\text{p,a}}$ uzima vrijednost 1005 J/(kg K) . [6] Broj izmjena zraka uslijed infiltracije u slučaju nepostojanja mehaničke ventilacije računa se prema jednadžbi (64).

$$n_{\text{inf}} = e_{\text{wind}} \cdot n_{50} \quad (64)$$

Faktor zaštićenosti zgrade od vjetra e_{wind} izabire se prema klasi zaklonjenosti zgrade i izloženosti fasada zgrade. Pretpostavljena je srednja zaklonjenost zgrade uz izloženost više od jedne fasade, za koju su iz [6] u skladu s normom HRN EN ISO 13789 očitane sljedeće vrijednosti faktora zaštićenosti:

$$e_{\text{wind}} = 0,07$$

$$f_{\text{wind}} = 15.$$

Proračunska vrijednost broja izmjena zraka pri nametnutoj razlici tlakova od 50 Pa izabrana je iz [6] za zgradu koja spada u III. kategoriju za općenito određivanje zrakopropusnosti zgrade u skladu s normom DIN V 18599-2 te iznosi

$$n_{50} = 6 \text{ h}^{-1}.$$

Iz jednadžbe (64) izračunat je broj izmjena zraka uslijed infiltracije.

$$n_{\text{inf}} = 0,42 \text{ h}^{-1}.$$

Prema tome, koeficijent ventilacijske izmjene topline izračunat prema jednadžbi (63) iznosi:

$$H_{\text{Ve,inf}} = 28,872 \text{ W/K}.$$

Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed otvaranja prozora (prozračivanja) izračunava se iz sljedeće jednadžbe:

$$H_{Ve,win} = \frac{n_{win} \cdot V \cdot \rho_a \cdot c_{p,a}}{3600} \left[\frac{W}{K} \right] \quad (65)$$

Određivanje broja izmjena zraka uslijed prozračivanja, n_{win} , provodi se pomoću Algoritma za ventilaciju i klimatizaciju [13], u kojem je navedena minimalna vrijednost n_{win} koja iznosi $0,1 \text{ h}^{-1}$. Ta se vrijednost može korigirati zbog utjecaja infiltracije ili postojanja mehaničke ventilacije. U ovom se proračunu koristi nekorrigirana vrijednost, dakle:

$$n_{win} = 0,1 \text{ h}^{-1}.$$

Koristeći navedenu vrijednost broja izmjena zraka uslijed prozračivanja, pomoću jednadžbe (65) izračunata je vrijednost koeficijenta ventilacijske izmjene topline uslijed prozračivanja:

$$H_{Ve,win} = 6,874 \text{ W/K}.$$

Uz poznate koeficijente ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije i prozračivanja, prema jednadžbi (62) određen je ukupni koeficijent ventilacijske izmjene topline u periodu grijanja, $H_{H,Ve}$.

$$H_{H,Ve} = 35,746 \text{ W/K}$$

Pomoću jednadžbe (61) određena je potrebna toplinska energija za ventilaciju kuće u periodu grijanja, za svaki mjesec u godini. Izračunate količine topline za ventilaciju jednake su za sve modele zgrade za koje su korišteni jednaki klimatski podaci. Iznosi za promatrani primjer kuće u kontinentalnoj Hrvatskoj prikazani su u Tablici 30.

Tablica 30. Toplina izmijenjena ventilacijom (zgrada u kontinentalnoj Hrvatskoj)

Mjesec	Q_{Ve} [kWh]	Mjesec	Q_{Ve} [kWh]
1	547,86	7	23,94
2	427,58	8	50,53
3	359,03	9	144,13
4	226,49	10	236,69
5	162,23	11	370,61
6	72,06	12	507,96

5.4.3. Unutarnji toplinski dobici

Ljudi i uređaji smješteni unutar zgrade doprinose ukupnim toplinskim dobicima zgrade. Za stambene prostore u proračunu se uzima iznos specifičnog unutarnjeg dobitka q_{spec} od 5 W/m^2 .

[6] Izraz za izračunavanje unutarnjih toplinskih dobitaka glasi:

$$Q_{\text{int}} = \frac{q_{\text{spec}} \cdot A_K \cdot t}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (66)$$

Iz jednadžbe (66) vidljivo je da unutarnji toplinski dobici ovise i o korisnoj površini zgrade, koja se mijenja ovisno o debljini građevnih slojeva u vanjskim zidovima navedenih u poglavlju 5.2., a za promatrani slučaj iznosi $76,27 \text{ m}^2$. Unutarnji toplinski dobici izračunati su za svaki mjesec u godini, pošto je proračunsko vrijeme t u prethodnoj jednadžbi jednako broju sati u mjesecu. Rezultati proračuna unutarnjih toplinskih dobitaka za promatrani model zgrade navedeni su u Tablici 31.

Tablica 31. Unutarnji toplinski dobici (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m^2 , srednja razina toplinske izolacije)

Mjesec	Q_{int} [kWh]	Mjesec	Q_{int} [kWh]
1	238,71	7	238,71
2	256,25	8	238,71
3	238,71	9	274,56
4	274,56	10	238,71
5	238,71	11	274,56
6	274,56	12	238,71

5.4.4. Solarni toplinski dobici

Prilikom proračuna toplinskih dobitaka od Sunčevog zračenja izračunava se razlika između količina dozračene energije Sunčevog zračenja kroz građevne dijelove zgrade i količine energije koja se gubi zračenjem od površine građevnih dijelova prema nebu. Proračun se provodi za vanjske zidove i prozore zgrade, dok se krov (crijep) nalazi iznad negrijanog tavanskog prostora te se ne uzima u obzir prilikom proračuna solarnih toplinskih dobitaka. Proračun srednje dozračene energije Sunčevog zračenja provodi se za svaki vanjski zid posebno, a te se vrijednosti zatim sumiraju kako bi se dobila vrijednost solarnih toplinskih

dobitaka za svaki proračunski mjesec. Izraz za određivanje srednje dozračene energije Sunčevog zračenja kroz jedan zid i njemu pripadajući prozor:

$$Q_{\text{sol},k} = \frac{F_{\text{sh,ob}} \cdot S_{\text{S},k} \cdot A_{\text{sol},k}}{3,6} + \frac{F_{\text{sh,ob}} \cdot S_{\text{S},k} \cdot A_{\text{sol},c}}{3,6} - \frac{F_{\text{r},k} \cdot \Phi_{\text{r},k} \cdot t}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (67)$$

Toplinski tok zračenja zida prema nebu, $\Phi_{\text{r},k}$, izražava se jednadžbom (68).

$$\Phi_{\text{r},k} = R_{\text{Se}} \cdot U_{\text{zid}} \cdot A_{\text{c}} \cdot h_{\text{r}} \cdot \Delta\vartheta_{\text{er}} \quad (68)$$

Uzima se da je prosječna temperaturna razlika između vanjske temperature zraka i temperature neba $\Delta\vartheta_{\text{er}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem jednak je peterostruko vrijednosti emisijskog faktora zida, odnosno:

$$h_{\text{r}} = 5 \varepsilon = 4,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad (69)$$

Kako bi se proračun proveo, određene su sljedeće pomoćne vrijednosti, prema [6]:

Faktor zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu Sunčevog zračenja:

$$F_{\text{sh,ob}} = 1$$

Faktor smanjenja zbog neokomitog upada Sunčevog zračenja:

$$F_{\text{W}} = 0,9$$

Faktor smanjenja zbog naprave za zaštitu od Sunčevog zračenja:

$$F_{\text{C}} = 1$$

Stupanj propuštanja ukupnog zračenja okomito na ostakljenje:

$$g_{\perp} = 0,6$$

Udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora:

$$F_{\text{F}} = 0,25$$

Faktor oblika za nezasjenjeni okomiti zid:

$$F_{\text{r},k} = 0,5.$$

Iz sljedećeg izraza izračunava se ukupna propusnost Sunčevog zračenja kroz prozirne elemente:

$$g_{gl} = F_W \cdot g_{\perp} = 0,54 \quad (70)$$

Ukupna propusnost Sunčevog zračenja kroz prozirne elemente s uključenom pomičnom zaštitom:

$$g_{gl+sh} = F_W \cdot g_{\perp} \cdot F_C = 0,54 \quad (71)$$

Faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja izračunava se, pomoću faktora f_{with} iz [6] prema jednadžbi (72).

$$F_{sh,gl} = \frac{(1 - f_{with}) \cdot g_{gl} + f_{with} \cdot g_{gl+sh}}{g_{gl}} = 1 \quad (72)$$

Izračunata je efektivna površina prozirnog elementa na koju upada Sunčevo zračenje:

$$A_{sol,k} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{pr} \quad (73)$$

Ona u promatranom slučaju za prozore na svakoj strani kuće iznosi:

$$A_{sol,k} = 2,025 \text{ m}^2.$$

Efektivna površina neprozirnih građevnih dijelova na koje upada Sunčevo zračenje izračunava se sljedećom jednadžbom:

$$A_{sol,c} = \alpha_S \cdot R_{Se} \cdot U_{zid} \cdot A_c \quad (74)$$

Korištenjem svih u ovom potpoglavlju (5.4.4.) navedenih jednadžbi i nabrojanih pomoćnih vrijednosti, izračunati su ukupni solarni dobici zgrade. U Tablici 32. su prikazani rezultati za odabrani model zgrade s faktorom apsorpcije $\alpha_S = 0,4$, uz usporedbu rezultata uz korištenje faktora apsorpcije Sunčevog zračenja visokoreflektivnog premaza i obične bijele fasadne boje.

Tablica 32. Solarni toplinski dobici, Q_{sol} [kWh] (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m², srednja razina toplinske izolacije)

Mjesec	Svijetla boja ($a_s = 0,4$)	VR premaz ($a_s = 0,268$)	Obična bijela ($a_s = 0,194$)
1	206,02	202,29	200,20
2	301,30	296,03	293,07
3	525,66	516,69	511,66
4	625,52	614,97	609,05
5	763,30	750,53	743,37
6	782,15	769,10	761,78
7	820,62	806,94	799,27
8	748,55	736,00	728,97
9	636,85	626,09	620,05
10	463,59	455,61	451,13
11	221,40	217,43	215,20
12	148,57	145,79	144,23
Godina	6243,51	6137,44	6077,98

5.4.5. Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje i trajanje sezone grijanja

U jednadžbi (38) pojavljuje se faktor $\eta_{H,gn}$, koji se naziva faktorom iskorištenja toplinskih dobitaka. Taj faktor definira koliki se udio ukupnih toplinskih dobitaka iskorištava za grijanje. Naime, prilikom grijanja zgrade može se dogoditi da unutarnja temperatura premaši postavljenu temperaturu unutarnjih prostora, zbog prevelikih toplinskih dobitaka zgrade. U tim vremenskim intervalima nije potrebno trošiti dodatnu energiju za grijanje. Kako bi se u proračunu potrebne toplinske energije za grijanje kvazistacionarnom mjesečnom metodom ova činjenica uzela u obzir, u jednadžbi (38) koristi se faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje. Ovaj je faktor uvijek ≤ 1 , a njegove su vrijednosti bliže jedinici u zimskim, nego u ljetnim mjesecima.

Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje izračunava se prema izrazima (76), (77) i (78), u ovisnosti o omjeru ukupnih toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom u režimu grijanja, y_H .

$$y_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad (75)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{1 - y_H^{a_H}}{1 - y_H^{a_H+1}}; \quad \text{za } y_H > 0 \text{ i } y_H \neq 1 \quad (76)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1}; \quad \text{za } y_H = 1 \quad (77)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{1}{y_H}; \quad \text{za } y_H < 0 \quad (78)$$

U prethodnim jednadžbama oznaka a_H predstavlja bezdimenzijski parametar koji se računa u ovisnosti o vremenskoj konstanti zgrade, τ . Ona ovisi o toplinskim svojstvima zgrade, odnosno njenom toplinskom kapacitetu i koeficijentima transmisije i ventilacijske izmjene topline te se računa iz izraza (79).

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H_{Tr} + H_{Ve}} \quad [h] \quad (79)$$

Efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zgrade izračunava se u ovisnosti o plošnoj masi vanjske ovojnice zgrade. Modeli zgrade za koje je napravljen proračun srednje su teške konstrukcije, pošto je plošna masa njihovih vanjskih zidova $250 \leq m' \leq 400 \text{ kg/m}^2$. Prema [6], za takve se zgrade efektivni toplinski kapacitet izražava kao:

$$C_m = 165 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot A_f \quad (80)$$

S obzirom da je površina zgrade s vanjskim dimenzijama jednaka 90 m^2 , efektivni toplinski kapacitet zgrade iznosi:

$$C_m = 14850 \text{ kJ/K} = 14850000 \text{ J/K}.$$

U jednadžbu (79) uvrštena je srednja vrijednost H_{Tr} , uz poznate vrijednosti C_m i H_{Ve} , te je dobiveno:

$$\tau = 26,07 \text{ h}.$$

Bezdimenzijski parametar a_H izračunava se iz izraza:

$$a_H = a_o + \frac{\tau}{\tau_{H,o}} \quad (81)$$

Za mjesečni proračun referentna vremenska konstanta $\tau_{H,o}$ iznosi 15 h, a parametar a_o iznosi 1.

Izračunata je vrijednost bezdimenzijskog parametra:

$$a_H = 2,738.$$

Omjer toplinskih dobitaka i topline izmijenjene transmisijom i ventilacijom (75) proračunava se za svaki mjesec te se korištenjem pomoćnih vrijednosti određuje udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni grijanja, $f_{H,m}$. Sljedećim jednadžbama izračunavaju se pomoćne vrijednosti:

$$y_{H,lim} = \frac{a_H + 1}{a_H} \quad (82)$$

$$y_{H,1} = \min\left(\frac{y_{H,m} + y_{H,m-1}}{2}, \frac{y_{H,m} + y_{H,m+1}}{2}\right) \quad (83)$$

$$y_{H,2} = \max\left(\frac{y_{H,m} + y_{H,m-1}}{2}, \frac{y_{H,m} + y_{H,m+1}}{2}\right) \quad (84)$$

Indeks $m-1$ odnosi se na mjesec prije onog za koji se proračunava udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni grijanja $f_{H,m}$, a indeks $m+1$ odnosi se na mjesec nakon onog za koji se proračunava $f_{H,m}$. Udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni grijanja izračunava se prema sljedećim jednadžbama:

$$f_{H,m} = 0,5 \cdot \frac{y_{H,lim} - y_{H,1}}{y_{H,m} - y_{H,1}}; \quad \text{za } y_{H,m} > y_{H,lim} \quad (85)$$

$$f_{H,m} = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{y_{H,lim} - y_{H,m}}{y_{H,2} - y_{H,m}}; \quad \text{za } y_{H,m} \leq y_{H,lim} \quad (86)$$

$$f_{H,m} = 1 \text{ (grijanje cijeli mjesec u radu);} \quad \text{za } y_{H,2} < y_{H,lim} \quad (87)$$

$$f_{H,m} = 0 \text{ (nema potrebe za grijanjem);} \quad \text{za } y_{H,1} > y_{H,lim} \quad (88)$$

Udjeli broja dana u mjesecu koji pripadaju sezoni grijanja određeni su za odabrani model zgrade i prikazani su u Tablici 33. za tri odabrana faktora apsorpcije Sunčevog zračenja.

Tablica 33. Udio broja dana koji pripadaju sezoni grijanja, $f_{h,m}$ [-] (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m², srednja razina toplinske izolacije)

Mjesec	Svijetla boja ($a_s = 0,4$)	VR premaz ($a_s = 0,268$)	Obična bijela ($a_s = 0,194$)
1, 2, 3, 4, 10, 11, 12	1	1	1
5	0,1780	0,2089	0,2266
6, 7, 8	0	0	0
9	0,3198	0,3430	0,3563

Ukupni broj dana grijanja u mjesecu izračunat je iz jednadžbe (89).

$$L_{H,m} = f_{H,m} \cdot d_m \quad (89)$$

5.4.6. Mjesečne i godišnje vrijednosti potrebne toplinske energije za grijanje

Kako bi se odredile točne vrijednosti potrebne toplinske energije za grijanje, uveden je bezdimenzijski redukcijски faktor kojim se u obzir uzimaju prekidi grijanja tijekom noći, $\alpha_{H,red}$. Redukcijski se faktor računa prema jednadžbi (90).

$$\alpha_{H,red} = 1 - 3 \cdot \left(\frac{\tau_{H,o}}{\tau} \right) \cdot y_H \cdot (1 - f_{H,hr}) \quad (90)$$

Za redukcijски faktor vrijedi:

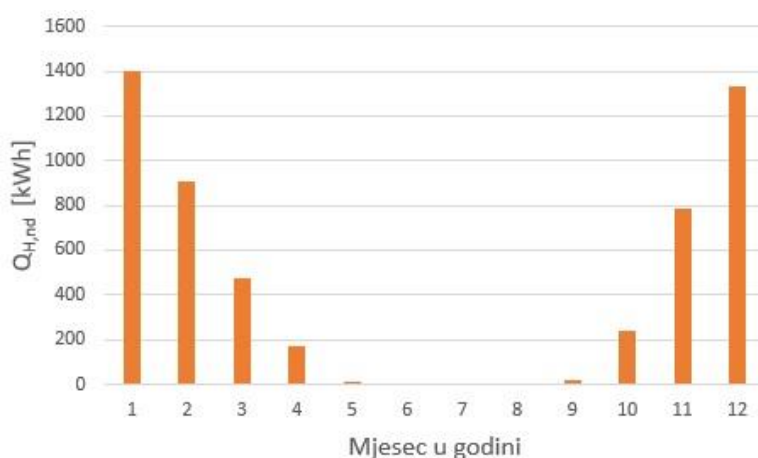
$$f_{H,hr} \leq \alpha_{H,red} \leq 1 \quad (91)$$

U jednadžbi (90) $f_{H,hr}$ označava udio sati u tjednu tijekom kojih grijanje radi s normalnom postavnom vrijednošću unutarnje temperature. Za stambene zgrade faktor $f_{H,hr}$ iznosi 0,71.

Mjesečna potrebna toplinska energija za grijanje izračunava se prema sljedećoj jednadžbi:

$$Q_{H,nd,m} = \alpha_{H,red} \cdot Q_{H,nd,cont,m} \cdot f_{H,m} \quad (92)$$

Sumiranjem po mjesecima dobiva se godišnja potrebna toplinska energija za grijanje zgrade. Rezultati za odabrani model zgrade s faktorom apsorpcije $a_s = 0,4$ prikazani su na Slici 39., dok je usporedba rezultata za tri promatrana faktora apsorpcije Sunčevog zračenja prikazana u Tablici 34.



Slika 39. Potrebna toplinska energija za grijanje po mjesecima

Tablica 34. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m², srednja razina izolacije)

Premaz zida	Svijetla boja	VR premaz	Obična bijela boja
a_s [-]	0,4	0,268	0,194
$Q_{H,nd}$ [kWh]	5338,59	5371,35	5390,74
$Q'_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	70	70,429	70,684

5.5. Proračun godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje $Q_{C,nd}$

Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje računski je određena količina topline koju sustavom hlađenja treba odvesti iz zgrade radi održavanja unutarnje proračunske temperature tijekom razdoblja hlađenja zgrade. Proračun je proveden kvazistacionarnom mjesečnom metodom, u skladu s normom HRN EN ISO 13790. Potrebna toplinska energija za hlađenje izračunata je za svaki mjesec u godini, a zatim su dobivene vrijednosti sumirane kako bi se odredila ukupna godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje.

Proračun je sličan proračunu potrebne toplinske energije za grijanje. Potrebna toplinska energija za hlađenje računa se iz jednadžbe (93).

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} \quad (93)$$

Ova jednadžba može se napisati i na sljedeći način:

$$Q_{C,nd,cont} = Q_{int} + Q_{sol} - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{Tr} + Q_{Ve}) \quad (94)$$

Kao i u poglavlju 5.4., proračun je proveden za sve modele zgrade opisane u poglavlju 5.2., a rezultati su detaljno prikazani za primjer kuće u kontinentalnoj Hrvatskoj, razine izolacije kojom se postiže specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje u iznosu od 70 kWh/m²a, uz postojanje prozora površine 5 m² na svakoj strani kuće i s faktorom apsorpcije Sunčevog zračenja vanjskih zidova $a_s = 0,4$.

5.5.1. Ukupni toplinski dobici

Ukupni toplinski dobici sastoje se od unutarnjih toplinskih dobitaka i toplinskih dobitaka od Sunčevog zračenja. Unutarnji toplinski dobici izračunavaju se na isti način kao u proračunu potrebne toplinske energije za grijanje. Postupak je opisan u poglavlju 5.4.3., a izračunate vrijednosti navedene su u Tablici 31.

S obzirom da analizirani modeli zgrada nemaju zaštitu od Sunčevog zračenja, postupak proračuna solarnih toplinskih dobitaka jednak je poput onog u proračunu potrebne toplinske energije za grijanje. Ovaj je postupak opisan u poglavlju 5.4.4., a izračunate vrijednosti navedene su u Tablici 32.

5.5.2. Toplina izmijenjena transmisijom i ventilacijom

Toplinska energija izmijenjena transmisijom i ventilacijom također se računa kao i prilikom proračuna potrebne toplinske energije za grijanje, odnosno, jednadžbama (95) i (96).

$$Q_{Tr} = \frac{H_{Tr}}{1000} (\vartheta_{int,C} - \vartheta_e) \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (95)$$

$$Q_{Ve} = \frac{H_{Ve}}{1000} (\vartheta_{int,C} - \vartheta_e) \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (96)$$

Postupak proračuna opisan je u poglavljima 5.4.1. i 5.4.2. Izračunate vrijednosti toplinske energije izmijenjene transmisijom, Q_{Tr} , navedene su u Tablici 29., dok su vrijednosti toplinske energije izmijenjene ventilacijom, Q_{Ve} , navedene u Tablici 30.

5.5.3. Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje i trajanje sezone hlađenja

Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje izračunava se iz izraza (98), (99) i (100), u ovisnosti o omjeru ukupnih toplinskih dobitaka i ukupne topline izmijenjene transmisijom i ventilacijom u režimu hlađenja, y_C .

$$y_C = \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ht}} \quad (97)$$

$$\eta_{C,ls} = \frac{1 - y_C^{-a_c}}{1 - y_C^{-(a_c+1)}}; \quad \text{za } y_C > 0 \text{ i } y_C \neq 1 \quad (98)$$

$$\eta_{C,ls} = \frac{a_C}{a_C + 1}; \quad \text{za } y_C = 1 \quad (99)$$

$$\eta_{C,ls} = 1; \quad \text{za } y_C < 0 \quad (100)$$

U izrazima (98) i (99) koristi se bezdimenzijski numerički parametar a_C kojim se uzima u obzir utjecaj toplinske inercije.

$$a_C = a_o + \frac{\tau}{\tau_{C,o}} \quad (101)$$

Vremenska konstanta zgrade τ izračunata je u poglavlju 5.4.5., pomoću jednadžbe (80). Njena je vrijednost:

$$\tau = 26,07 \text{ h}$$

Referentna vremenska konstanta za hlađenje $\tau_{C,o}$ i parametar a_o iznose:

$$\tau_{C,o} = 15 \text{ h}$$

$$a_o = 1.$$

Pomoću omjera toplinskih dobitaka i ukupno izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom, za svaki je mjesec u godini određen udio broja dana koji pripada sezoni hlađenja $f_{C,m}$. Radi provedbe proračuna, sljedećim jednadžbama izračunati su pomoćni parametri:

$$\left(\frac{1}{y_C}\right)_{\lim} = \frac{a_C + 1}{a_C} \quad (102)$$

$$\left(\frac{1}{y_C}\right)_1 = \min\left(\frac{\left(\frac{1}{y_C}\right)_m + \left(\frac{1}{y_C}\right)_{m-1}}{2}, \frac{\left(\frac{1}{y_C}\right)_m + \left(\frac{1}{y_C}\right)_{m+1}}{2}\right) \quad (103)$$

$$\left(\frac{1}{y_C}\right)_2 = \max\left(\frac{\left(\frac{1}{y_C}\right)_m + \left(\frac{1}{y_C}\right)_{m-1}}{2}, \frac{\left(\frac{1}{y_C}\right)_m + \left(\frac{1}{y_C}\right)_{m+1}}{2}\right) \quad (104)$$

Indeks $m-1$ odnosi se na mjesec prije onog za koji se proračunava udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni hlađenja $f_{C,m}$, a indeks $m+1$ odnosi se na mjesec nakon onog za koji se proračunava $f_{C,m}$. Udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni hlađenja izračunava se prema sljedećim jednadžbama:

$$f_{C,m} = 0,5 \cdot \frac{\left(\frac{1}{y_C}\right)_{\lim} - \left(\frac{1}{y_C}\right)_1}{\left(\frac{1}{y_C}\right)_m - \left(\frac{1}{y_C}\right)_1}; \quad \text{za } \left(\frac{1}{y_C}\right)_m > \left(\frac{1}{y_C}\right)_{\lim} \quad (105)$$

$$f_{C,m} = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{\left(\frac{1}{y_C}\right)_{\lim} - \left(\frac{1}{y_C}\right)_m}{\left(\frac{1}{y_C}\right)_2 - \left(\frac{1}{y_C}\right)_m}; \quad \text{za } \left(\frac{1}{y_C}\right)_m \leq \left(\frac{1}{y_C}\right)_{\lim} \quad (106)$$

$$f_{C,m} = 1 \text{ (hlađenje cijeli mjesec u radu);} \quad \text{za } \left(\frac{1}{y_C}\right)_2 < \left(\frac{1}{y_C}\right)_{\lim} \quad (107)$$

$$f_{C,m} = 0 \text{ (nema potrebe za hlađenjem);} \quad \text{za } \left(\frac{1}{y_C}\right)_1 > \left(\frac{1}{y_C}\right)_{\lim} \quad (108)$$

Udjeli broja dana u mjesecu koji pripadaju sezoni hlađenja određeni su za odabrani model zgrade i prikazani su u Tablici 35. za tri odabrana faktora apsorpcije Sunčevog zračenja.

Tablica 35. Udio broja dana koji pripadaju sezoni hlađenja, $f_{C,m}$ [-] (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m², srednja razina toplinske izolacije)

Mjesec	Svijetla boja ($a_s = 0,4$)	VR premaz ($a_s = 0,268$)	Obična bijela ($a_s = 0,194$)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0,0114	0	0
4	1	0,9897	0,9775
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	1
10	0,5657	0,5569	0,5520
11	0	0	0
12	0	0	0

Ukupni broj dana hlađenja za svaki je mjesec izračunat iz jednadžbe (109).

$$L_{C,m} = f_{C,m} \cdot d_m \quad (109)$$

5.5.4. Mjesečne i godišnje vrijednosti potrebne toplinske energije za hlađenje

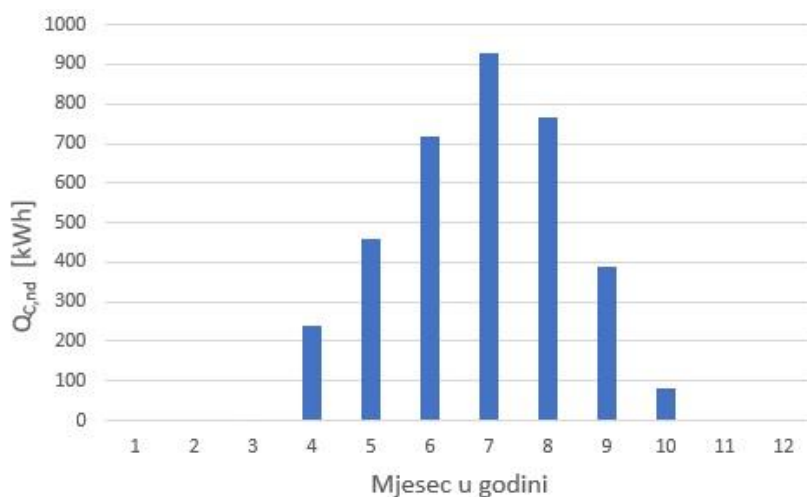
Smatra se da sustav hlađenja za odabrane modele zgrade radi bez prekida tijekom vikenda, tako da je bezdimenzijski redukcijski faktor jednak:

$$\alpha_{C,\text{red}} = 1$$

Mjesečna potrebna toplinska energija za hlađenje izračunava se prema sljedećoj jednadžbi:

$$Q_{C,\text{nd},m} = \alpha_{C,\text{red}} \cdot Q_{C,\text{nd},\text{cont},m} \cdot f_{C,m} \quad (110)$$

Sumiranjem po mjesecima dobiva se godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje zgrade. Rezultati za odabrani model zgrade s faktorom apsorpcije $a_s = 0,4$ prikazani su na Slici 40., dok je usporedba rezultata za tri promatrana faktora apsorpcije Sunčevog zračenja prikazana u Tablici 36.



Slika 40. Potrebna toplinska energija za hlađenje po mjesecima

Tablica 36. Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje (kontinentalna Hrvatska, prozori površine 5 m², srednja razina izolacije)

Premaz zida	Svijetla boja	VR premaz	Obična bijela boja
a_s [-]	0,4	0,268	0,194
$Q_{C,\text{nd}}$ [kWh]	3579,15	3507,26	3466,24
$Q'_{C,\text{nd}}$ [kWh/m ² a]	46,93	45,99	45,45

5.6. Analiza rezultata proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje

U ovom je poglavlju dan pregled rezultata proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje. Najprije su određeni omjeri specifičnih godišnjih potrebnih toplina za grijanje i hlađenje obiteljskih kuća s vanjskim zidovima premazanim visokoreflektivnim premazom u odnosu na potrebne energije obiteljskih kuća čiji su zidovi svijetle boje, faktora apsorpcije Sunčevog zračenja $a_s = 0,4$. Analiza je napravljena i za modele sa zidovima obične bijele boje ($a_s = 0,194$). Određena je i količina ukupne isporučene energije te je napravljena procjena troškova energije u ovisnosti o faktoru apsorpcije Sunčevog zračenja.

5.6.1. Potrebna toplinska energija za grijanje

Napravljena je usporedba potrebnih toplinskih energija za grijanje za sve opisane modele zgrada navedene u poglavlju 5.2. Za sve su modele razmatrane po dvije ili tri različite razine izolacije, koje su opisane u uvodu poglavlja 5. i u poglavlju 5.2.

U sljedećim tablicama navedena su povećanja specifične godišnje potrebne topline za grijanje kuća u kontinentalnoj Hrvatskoj (Tablica 37.) i primorskoj Hrvatskoj (Tablica 38.), u odnosu na kuće sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$).

Tablica 37. Povećanje specifične godišnje potrebne toplinske energije za grijanje u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska

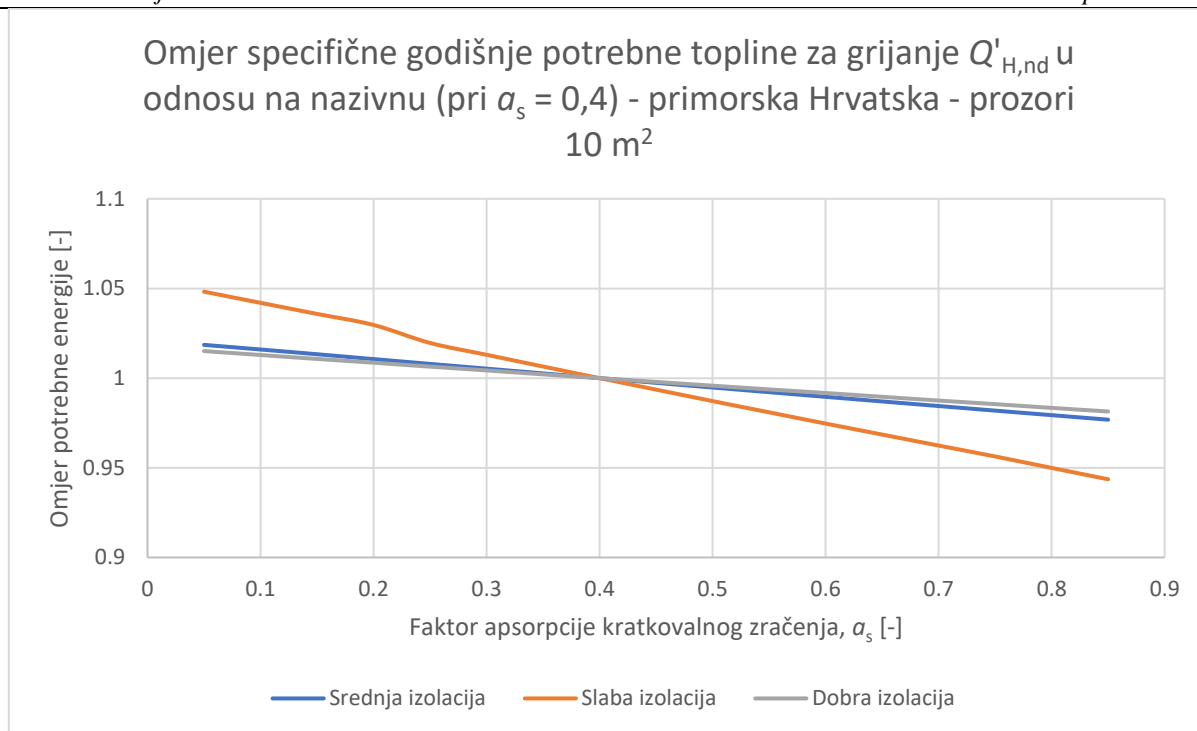
Razina izolacije	VR premaz ($a_s = 0,268$)		Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)	
	Srednja	Slaba	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m ²	0,61	1,56	0,98	2,55
Prozori površine 10 m ²	0,39	1,26	0,59	1,97

Tablica 38. Povećanje specifične godišnje potrebne topline za grijanje u odnosu na kuću s istim prozorima i zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska

	VR premaz ($a_s = 0,268$)			Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)		
Razina izolacije	Dobra	Srednja	Slaba	Dobra	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m ²	1,00	0,98	2,80	1,57	1,54	4,43
Prozori površine 10 m ²	0,56	0,70	1,72	0,88	1,09	3,04

Za svaki je model kuće primjetno da specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje raste smanjenjem faktora apsorpcije Sunčevog zračenja. Također je primjetno da su povećanja najizraženija za razine izolacije kojima se pri faktoru apsorpcije 0,4 postiže specifična godišnja potrebna topline za grijanje $Q'_{H,nd} = 150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Brojčane vrijednosti navedene za svaki od modela zgrade u prethodne dvije tablice mogu se razlikovati ovisno o načinu postizanja željene vrijednosti specifične godišnje potrebne topline za grijanje. Naime, željeni $Q'_{H,nd}$ može se ostvariti različitim kombinacijama debljina toplinske izolacije u zidovima, stropu i podu. Na solarne toplinske dobitke osim faktora apsorpcije zidova utječe i njihov koeficijent prolaza topline, prema jednadžbama (67) i (68), a različitim se kombinacijama postižu i različite vrijednosti toplinskih gubitaka. Iako se svim kombinacijama na kraju ostvaruje jednaki iznos specifične godišnje potrebne topline za grijanje pri $a_s = 0,4$, utjecaj solarnih toplinskih dobitaka na izračun vrijednosti $Q'_{H,nd}$ neće biti jednak, a samim time mijenja se i utjecaj faktora apsorpcije na iznos specifične godišnje potrebne topline za grijanje.

Na Slici 41. prikazan je dijagram ovisnosti promjene omjera specifične godišnje potrebne toplinske energije za grijanje o faktoru apsorpcije Sunčevog zračenja vanjskih zidova za tri različite razine izolacije kuće u primorskoj Hrvatskoj, s prozorima površine 10 m² na svakoj strani kuće. Omjeri specifičnih godišnjih potrebnih toplina određeni su za svaki model kuće u odnosu na njima jednake modele, ali s faktorom apsorpcije vanjskih zidova $a_s = 0,4$. Građevni dijelovi triju kuća navedeni su u poglavlju 5.2. Iz slike je vidljivo da potrebne topline za grijanje padaju s porastom faktora apsorpcije Sunčevog zračenja.



Slika 41. Dijagram ovisnosti specifične godišnje potrebne topline za grijanje o faktoru apsorpcije za tri razine izolacije kuće u primorskoj Hrvatskoj

5.6.2. Potrebna toplinska energija za hlađenje

Kao i za godišnju potrebnu toplinsku energiju za grijanje, napravljena je analiza rezultata godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje. U sljedećim tablicama navedena su smanjenja specifične godišnje potrebne topline za hlađenje kuća u kontinentalnoj Hrvatskoj (Tablica 39.) i primorskoj Hrvatskoj (Tablica 40.), u odnosu na kuće sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$).

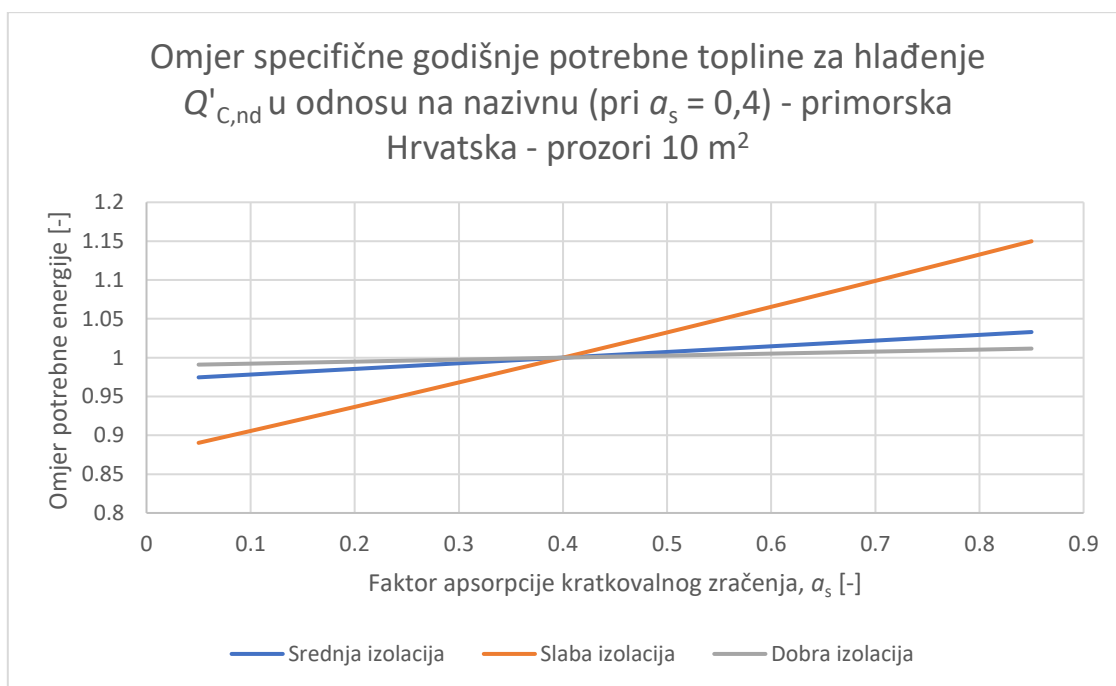
Tablica 39. Smanjenje specifične godišnje toplinske energije za hlađenje u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska

Razina izolacije	VR premaz ($a_s = 0,268$)		Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)	
	Srednja	Slaba	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m^2	2,01	8,09	3,15	12,48
Prozori površine 10 m^2	0,87	4,41	1,36	6,84

Tablica 40. Smanjenje specifične godišnje potrebne topline za hlađenje u odnosu na kuću s istim prozorima i zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska

	VR premaz ($a_s = 0,268$)			Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)		
Razina izolacije	Dobra	Srednja	Slaba	Dobra	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m ²	0,81	2,29	8,47	1,26	3,56	13,06
Prozori površine 10 m ²	0,34	0,96	4,21	0,53	1,50	6,53

Iz prethodne dvije tablice vidljivo je da smanjenjem faktora apsorpcije Sunčevog zračenja opada i iznos specifične godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje zgrade. S obzirom da većina solarnih toplinskih dobitaka u zgradu ulazi kroz njene prozirne dijelove, utjecaj faktora apsorpcije veći je kod zgrada s manjim prozorima. Kao i kod specifičnih potrebnih topline za grijanje, točne vrijednosti uštede potrebne toplinske energije za hlađenje ovise o kombinacijama debljina termoizolacijskih materijala u stropu, podu i vanjskim zidovima.



Slika 42. Dijagram ovisnosti specifične godišnje potrebne topline za hlađenje o faktoru apsorpcije za tri razine izolacije kuće u primorskoj Hrvatskoj

Na Slici 42. prikazan je dijagram ovisnosti promjene omjera specifične godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje o faktoru apsorpcije Sunčevog zračenja vanjskih zidova za tri različite razine izolacije kuće u primorskoj Hrvatskoj, s prozorima površine 10 m^2 na svakoj strani kuće. Omjeri specifičnih godišnjih potrebnih toplina određeni su za svaki model kuće u odnosu na njima jednake modele, ali s faktorom apsorpcije vanjskih zidova $a_s = 0,4$. Građevni dijelovi triju kuća navedeni su u poglavlju 5.2. Iz slike je vidljivo da potrebne topline za hlađenje rastu s porastom faktora apsorpcije Sunčevog zračenja vanjskih zidova.

5.6.3. Isporučena energija

Napravljen je i orijentacijski proračun isporučene energije, E_{del} , za svaki model zgrade. Naime, u prethodnim poglavljima proveden je proračun potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje. To su količine toplinske energije koje je potrebno dovesti, odnosno odvesti iz kondicioniranog dijela zgrade kako bi se u njemu postigla željena projektna temperatura. S obzirom da u sustavima grijanja i hlađenja postoje određeni gubici energije, zgradi je potrebno dovesti više energije od one koja je jednaka potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje ili hlađenje. U analiziranim modelima zgrade nisu definirani konkretni sustavi grijanja i hlađenja, tako da je ovaj proračun napravljen pomoću referentnih vrijednosti za određivanje godišnje isporučene energije, E_{del} [kWh], odnosno specifične godišnje isporučene energije, E'_{del} [kWh/m²a], navedenih u nastavku. Pretpostavljeni energent za grijanje zgrada je plin, dok je rashladni sustav zgrade pogonjen električnom energijom.

Omjer isporučene energije za grijanje i godišnje potrebne toplinske energije za grijanje uzet je prema računskom primjeru iz [14] te iznosi:

$$e_H = E_{H,\text{del}}/Q_{H,\text{nd}} = 1,386.$$

Omjer isporučene toplinske energije za hlađenje i godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje uzet je prema računskom primjeru za sobni sustav iz [13] te iznosi:

$$e_C = Q_{C,\text{gen,in}}/Q_{C,\text{nd}} = 1,3.$$

Iz isporučene toplinske energije za hlađenje izračunata je isporučena električna energija rashladnom sustavu, dijeljenjem sa sezonskom energetsom učinkovitosti (*SEER*), čija se vrijednost prema katalogima proizvođača [15] obično kreće između 4,5 i 6,5 (Wh)/(Wh), a u ovom je proračunu uzeta vrijednost:

$$SEER = 6 \text{ (Wh)/(Wh)}.$$

Ukupna godišnja isporučena energija izračunata je prema sljedećem izrazu:

$$E_{\text{del}} = e_H \cdot Q_{H,\text{nd}} + \frac{e_C \cdot Q_{C,\text{nd}}}{SEER} \text{ [kWh]} \quad (111)$$

Specifična godišnja isporučena energija, E'_{del} [kWh/m²a] određuje se dijeljenjem godišnje isporučene energije s korisnom površinom zgrade. Rezultati su prikazani u Tablici 41. i Tablici 42.

Tablica 41. Specifična godišnja isporučena energija u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska

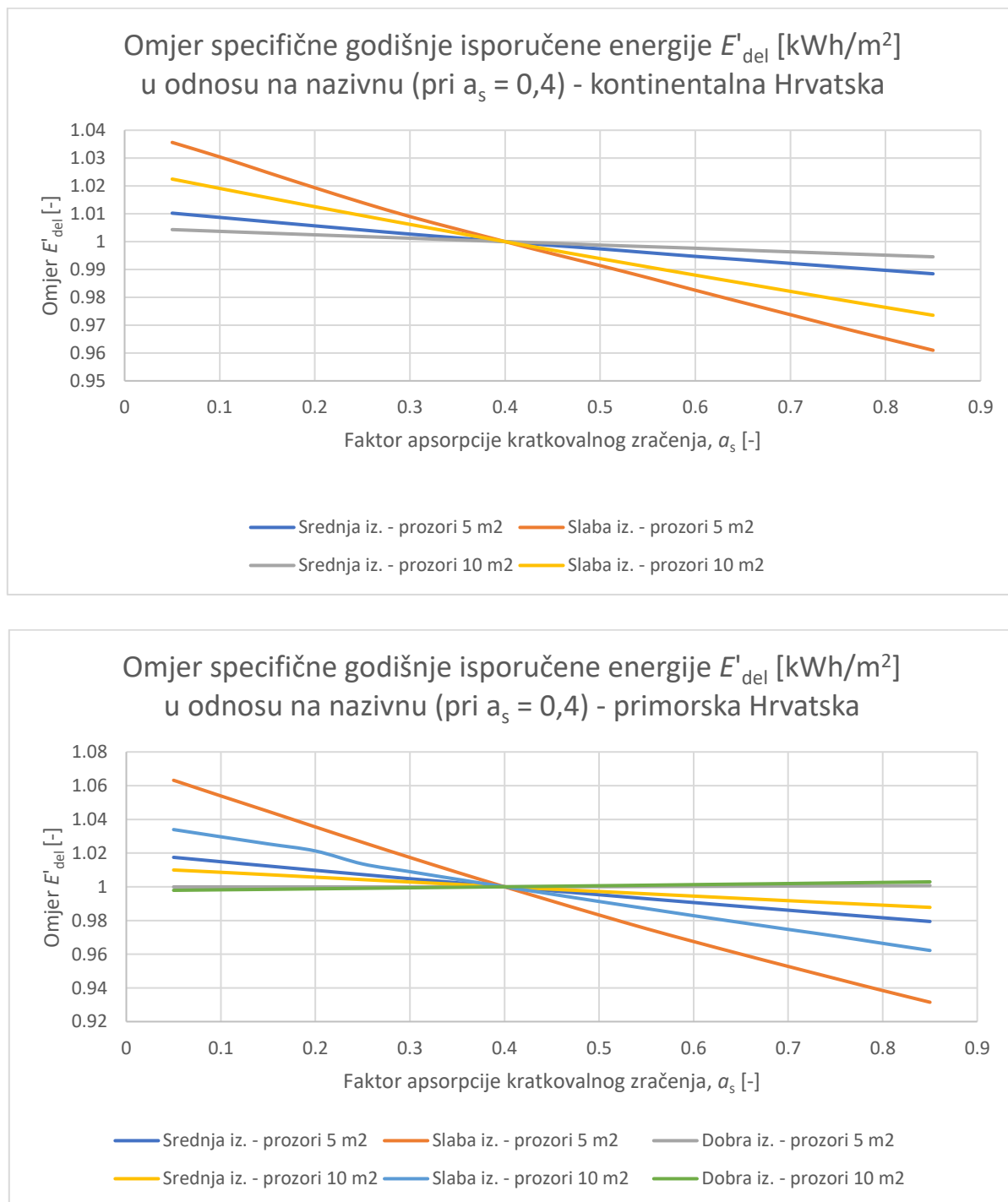
	VR premaz ($a_s = 0,268$)		Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)	
Razina izolacije	Srednja	Slaba	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m ²	+ 0,36	+ 1,21	+ 0,58	+ 2,00
Prozori površine 10 m ²	+ 0,14	+ 0,82	+ 0,25	+ 1,29

Tablica 42. Specifična godišnja isporučena energija u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska

	VR premaz ($a_s = 0,268$)			Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)		
Razina izolacije	Dobra	Srednja	Slaba	Dobra	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m ²	- 0,008	+ 0,64	+ 2,31	- 0,009	+1,01	+ 3,66
Prozori površine 10 m ²	- 0,08	+ 0,38	+ 1,19	- 0,12	+ 0,59	+ 2,18

Iz prethodne dvije tablice vidljivo je da se najveći porast specifične godišnje isporučene energije javlja kod lošije izoliranih zgrada, uz niže faktore apsorpcije Sunčevog zračenja. Neznatne uštede primijećene su kod zgrada razine izolacije s kojom se postiže $Q'_{H,\text{nd}} = 10$ kWh/m²a. Točne vrijednosti uštede ili povećanja specifične godišnje isporučene energije ovise

o kombinacijama debljina termoizolacijskih materijala u stropu, podu i vanjskim zidovima te o odabranim vrijednostima faktora e_H , e_C i $SEER$. Na Slici 43. prikazani su dijagrami ovisnosti specifične godišnje isporučene energije o faktoru apsorpcije za različite razine izolacije kuće.



Slika 43. Dijagram ovisnosti specifične godišnje isporučene energije o faktoru apsorpcije za različite razine izolacije kuće: a) kontinentalna, b) primorska Hrvatska

5.6.4. Troškovi energije

Kako bi se odredila isplativost korištenja različitih premaza za fasade na analiziranim modelima zgrade, napravljena je analiza troškova energije. Određena je novčana vrijednost izračunatih količina godišnjih isporučenih energija za grijanje i hlađenje. Cijena plina za grijanje određena je prema vrijednosti u studenom 2017. godine, iz [16], te iznosi $0,31 \cdot 1,25 = 0,3875$ kn/kWh s uključenim PDV-om. Za cijenu električne energije uzeta je vrijednost više tarife u studenom 2017. godine, prema [17]. Ona iznosi 1,1063 kn/kWh s uključenim PDV-om. Viša tarifa odabrana je s obzirom da sustav hlađenja uglavnom nije uključen tijekom dijelova dana u kojima se obračunava niža tarifa električne energije. Povećanja ili smanjenja godišnjih troškova energije navedena su u Tablici 43. i Tablici 44.

Tablica 43. Godišnji troškovi energije u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; kontinentalna Hrvatska

Razina izolacije	VR premaz ($a_s = 0,268$)		Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)	
	Srednja	Slaba	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m ²	+ 0,010	+ 0,621	+ 0,025	+ 1,085
Prozori površine 10 m ²	- 0,100	+ 0,167	- 0,155	+ 0,277

Tablica 44. Godišnji troškovi energije u odnosu na kuću sa zidovima svijetle boje ($a_s = 0,4$) [%]; primorska Hrvatska

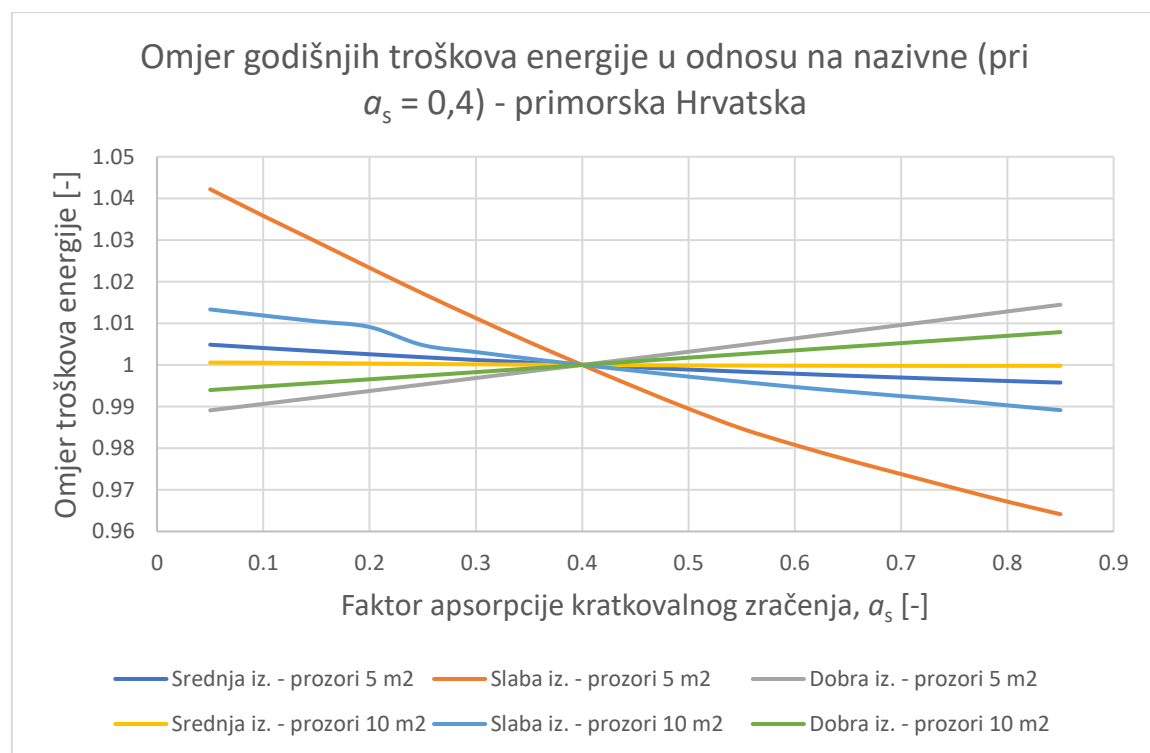
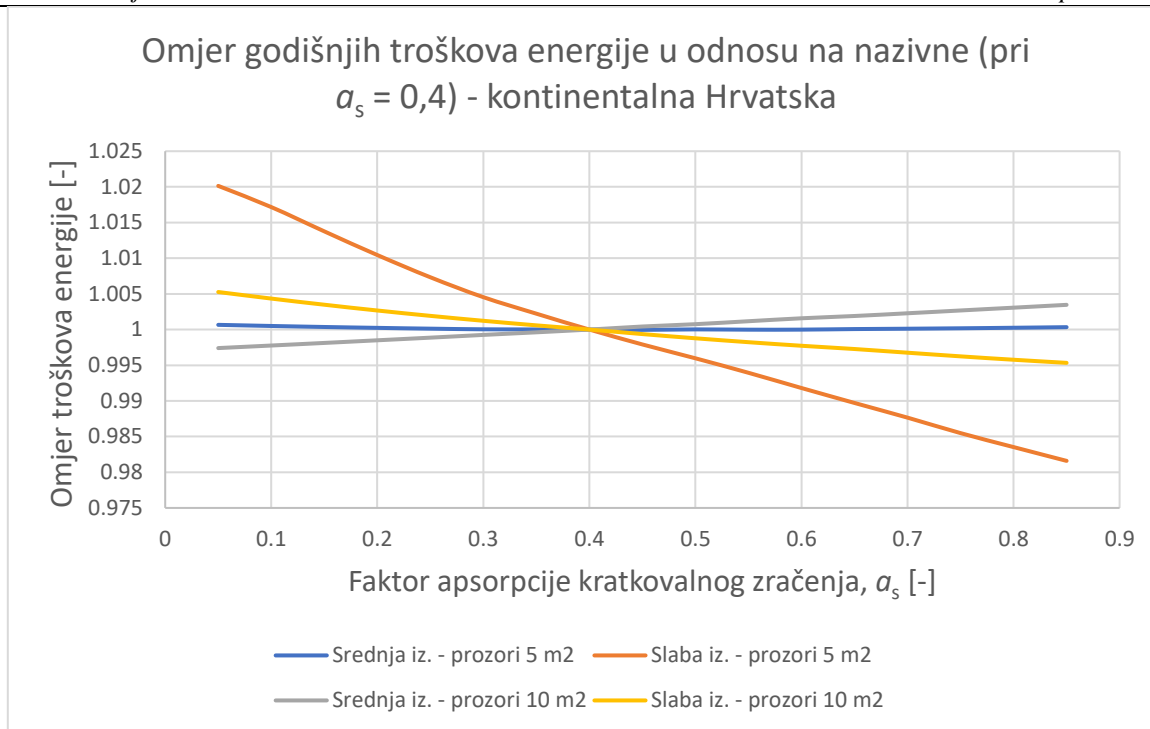
Razina izolacije	VR premaz ($a_s = 0,268$)			Obična bijela boja ($a_s = 0,194$)		
	Dobra	Srednja	Slaba	Dobra	Srednja	Slaba
Prozori površine 5 m ²	- 0,415	+ 0,160	+ 1,504	- 0,646	+ 0,265	+ 2,408
Prozori površine 10 m ²	- 0,228	+ 0,021	+ 0,414	- 0,356	+ 0,034	+ 0,926

Najveći porast godišnjih troškova energije javlja se pri nižim faktorima apsorpcije i slabijoj razini toplinske izolacije ($Q'_{H,nd} = 150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Iako je za takve modele kuća izračunat najveći postotak uštede u godišnjoj potrebnoj energiji za hlađenje prilikom korištenja premaza nižih faktora apsorpcije (Tablica 39. i Tablica 40.), oni imaju i najveće povećanje godišnje potrebne energije za grijanje (Tablica 37. i Tablica 38.). Cijena plina po kilovatsatu manja je od cijene električne energije po kilovatsatu, ali navedeni primjeri kuća imaju znatno veće ukupne iznose godišnje potrebne energije za grijanje, nego za hlađenje. (Tablica 45.) Na primjer, za kuću u primorskoj Hrvatskoj, razine izolacije kojom se postiže $Q'_{H,nd} = 150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, s faktorom apsorpcije $a_s = 0,4$ i prozorima površine 5 m^2 , određen je iznos specifične godišnje potrebne energije za hlađenje $Q'_{C,nd} = 43,83 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. U takvoj bi se kući godišnje za potrebe grijanja trošilo 5622 kn više nego za potrebe hlađenja. Uštede na hlađenju smanjenjem a_s trebale bi biti znatno veće od povećanja potrebe za grijanjem, kako bi se primjenom premaza nižih faktora apsorpcije u takvoj kući ostvarila novčana ušteda na godišnjoj razini.

Tablica 45. Specifična godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje uz prozore površine 5 m^2 (faktor apsorpcije $a_s = 0,4$) – primorska Hrvatska

Razina izolacije	Dobra	Srednja	Slaba
$Q'_{H,nd} [\text{kWh/m}^2\text{a}]$	10	70	150
$Q'_{C,nd} [\text{kWh/m}^2\text{a}]$	80,83	52,34	43,83

Neznatno smanjenje godišnjih troškova energije javlja se prilikom primjene premaza nižih faktora apsorpcije na zgradama kvalitetnije toplinske izolacije ($Q'_{H,nd} = 10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$), koje troše više energije za hlađenje, nego za grijanje. Kod zgrada u kontinentalnoj Hrvatskoj srednje izolacije ($Q'_{H,nd} = 10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) i prozora površine 10 m^2 također je primijećena ušteda u troškovima, unatoč povećanju ukupne isporučene energije zgradi. Razlog tome je veća ušteda u troškovima energije za hlađenje, nego povećanje troškova energije za grijanje takvih zgrada. Na Slici 44. prikazani su dijagrami ovisnosti troškova energije o faktoru apsorpcije za različite razine izolacije kuće.



Slika 44. Dijagrami ovisnosti troškova energije o faktoru apsorpcije za različite razine izolacije kuće: a) kontinentalna Hrvatska, b) primorska Hrvatska

6. ZAKLJUČAK

U ovom su radu primjenom termografije određena svojstva visokoreflektivnog premaza za fasade, u svrhu analize potencijala uštede potrebne toplinske energije za hlađenje zgrade, a time i povećanja energetske učinkovitosti zgrade. Rezultati dobiveni mjerenjima i analizom snimljenih termograma iskorišteni su za dobivanje vrijednosti faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja ispitivanog premaza. Proračun potrebne toplinske energije napravljen je za nekoliko različitih modela obiteljske kuće. Simulirane su tri različite razine izolacije kuće, podešavanjem debljine i vrste toplinske izolacije u građevnim dijelovima kuće, uz postizanje specifične godišnje potrebne toplinske energije za grijanje od 10 kWh/m²a, 70 kWh/m²a i 150 kWh/m²a, s faktorom apsorpcije Sunčevog zračenja vanjskih zidova $a_s = 0,4$. Promatrani su modeli kuća s površinom prozora jednakom 5 m² ili 10 m² na svakoj od četiriju strana kuće, uz vanjske dimenzije tlocrta kuće 10 m x 9 m i visinu kondicionirane zone 3 m. Osim proračuna potrebne toplinske energije za hlađenje, napravljeni su proračuni potrebne toplinske energije za grijanje, ukupno isporučene energije te troškova energije. Napravljena je analiza ovisnosti svih nabrojanih energija te troškova energije o faktoru apsorpcije površine fasade za svaki od analiziranih modela obiteljske kuće.

Određeno je da emisijski faktor dugovalnog zračenja za svaku ispitivanu površinu iznosi 0,9. Određeni su i iznosi faktora apsorpcije kratkovalnog Sunčevog zračenja. Za ispitivani visokoreflektivni premaz taj faktor iznosi 0,268, za crnu površinu bez VR premaza iznosi 0,879, dok za običnu bijelu fasadnu boju iznosi 0,194. Ti su podaci iskorišteni u proračunu prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790.

Najveće smanjenje godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje prilikom korištenja visokoreflektivnih premaza primijećeno je kod lošije izoliranih kuća (razine $Q'_{H,nd} = 150$ kWh/m²a). Smanjenje je izraženo što su manje vrijednosti faktora apsorpcije Sunčevog zračenja, a potencijal uštede ovisi i o godišnjim klimatskim uvjetima na lokaciji zgrade. Najveća moguća smanjenja uz korištenje premaza niskih faktora apsorpcije ($a_s = 0,1$) iznose oko 10 % za slabije izolirane zgrade s prozorima površine 10 m², te oko 20 % za slabije izolirane zgrade s prozorima površine 5 m², u odnosu na zgrade s faktorom apsorpcije $a_s = 0,4$. Primjenom tamnih premaza faktora apsorpcije oko 0,85 kod slabije izoliranih kuća s prozorima površine 5 m² u primorskoj Hrvatskoj, dolazi do povećanja potrebne toplinske energije za

hlađenje u iznosu od oko 36 % u odnosu na faktor apsorpcije $a_s = 0,4$. Vrijednosti su slične i za zgrade u kontinentalnoj Hrvatskoj, za koju najveće izračunato povećanje iznosi oko 29 %. Ako se tamni premaz koristi na zgradama s prozorima površine 10 m^2 , najveća povećanja potrebne toplinske energije za hlađenje iznose oko 15 % za obje lokacije.

Proračunom je također utvrđeno da primjena visokoreflektivnih premaza povećava iznos potrebne toplinske energije za grijanje zgrade. Povećanja $Q'_{H,nd}$ u usporedbi s kućom čija fasada ima faktor apsorpcije $a_s = 0,4$ izraženija su kod lošije izoliranih kuća. Najveće izračunate vrijednosti povećanja uz korištenje premaza niskih faktora apsorpcije ($a_s = 0,1$) iznose oko 4 % za slabo izolirane kuće s prozorima površine 10 m^2 i 6,5 % za slabo izolirane kuće s prozorima površine 5 m^2 , u primorskoj Hrvatskoj. U kontinentalnoj Hrvatskoj najveća moguća povećanja iznose oko 3 do 4 %. Tamni premazi faktora apsorpcije $a_s = 0,85$ smanjuju potrebnu toplinsku energiju za grijanje za otprilike 5 % u kontinentalnoj i 9 % u primorskoj Hrvatskoj, u odnosu na zgradu s fasadom faktora apsorpcije 0,4 (površine prozora 5 m^2). Za kuće s površinama prozora po 10 m^2 smanjenja u slučaju tamnih premaza iznose otprilike 4 % u kontinentalnoj i 5,5 % u primorskoj Hrvatskoj.

Napravljen je orijentacijski proračun ukupne isporučene energije. Za grijanje kuća kao energent je odabran plin, dok je za hlađenje kuća odabrana električna energija kojom je pogonjen rashladni uređaj sezonske energetske učinkovitosti $SEER = 6 \text{ (Wh)/(Wh)}$. Gubici koji određuju razliku isporučene energije i potrebnih toplinskih energija pretpostavljeni su prema primjerima iz [13] i [14]. Za odabrane faktore gubitaka i sezonsku energetske učinkovitost rashladnog uređaja, primijećeno je povećanje godišnje isporučene energije kod primjene visokoreflektirajućih fasadnih premaza. Povećanja su izraženija što je lošija toplinska izolacija kuće (razina $Q'_{H,nd} = 150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Najveća određena povećanja, kod primjene faktora apsorpcije oko 0,1 na slabije izoliranim zgradama s prozorima površine 5 m^2 , iznose 3 % za kontinentalnu Hrvatsku i oko 5,5 % za primorsku Hrvatsku, u odnosu na zgradu s fasadom faktora apsorpcije 0,4. Za kuće s prozorima površine 10 m^2 , najveća povećanja isporučene energije iznose otprilike 2 % u kontinentalnoj i 3 % u primorskoj Hrvatskoj. Neznatne uštede godišnje isporučene energije (manje od 1 %) primijećene su kod bolje toplinski izoliranih zgrada (razine $Q'_{H,nd} = 10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Najveće uštede isporučene energije u odnosu na primjenu premaza faktora apsorpcije $a_s = 0,4$ javljaju se kod primjene tamnih premaza, faktora apsorpcije $a_s = 0,85$ (4 % u kontinentalnoj i 7 % u primorskoj Hrvatskoj, za slabo izolirane kuće prozora površine 5 m^2). Utjecaj faktora apsorpcije Sunčevog zračenja na sve promatrane iznose energije izraženiji je što je veći udio vanjskih zidova u ukupnoj ploštini vanjske ovojnice zgrade, odnosno što je manja površina prozora na zgradi.

U analizi troškova energije korištene su cijene plina i više tarife električne energije iz studenog 2017. godine. Ovisno o toplinskoj izolaciji zgrade, primijećena su povećanja ili uštede u troškovima energije prilikom korištenja visokoreflektirajućih premaza. Postizanje uštede ili povećanja troškova ovisi o udjelima isporučene energije za grijanje i hlađenje te izraženosti povećanja godišnje potrebne toplinske energije za grijanje i smanjenja godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje zgrade, ovisno o iznosu faktora apsorpcije Sunčevog zračenja površine vanjskih zidova zgrade. Primjenom visokoreflektirajućih premaza kod zgrada razine toplinske izolacije kojom se postiže $Q'_{H,nd} = 150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, dolazi do najvećih povećanja troškova energije u usporedbi s korištenjem premaza faktora apsorpcije $a_s = 0,4$. Što je korišteni faktor apsorpcije na takvim zgradama niži, izraženije je povećanje troškova energije. Najizraženije povećanje troškova, kod primjene faktora apsorpcije oko 0,1, javlja se za slabo izolirane zgrade površine prozora 5 m^2 (oko 2 % u kontinentalnoj i oko 3,5 % u primorskoj Hrvatskoj). Smanjenje troškova do 1 % primijećeno je za dobro izolirane zgrade. Za lošije izolirane zgrade s prozorima površine 10 m^2 troškovi energije povećavaju se za otprilike 1 % u odnosu na zgrade s faktorom apsorpcije 0,4. Korištenjem tamnih premaza, $a_s = 0,85$, može se ostvariti smanjenje troškova do 2 % u kontinentalnoj i 3,5 % u primorskoj Hrvatskoj za slabije izolirane zgrade prozora površine 5 m^2 . Za bolje izolirane zgrade primjena tamnih premaza znači povećanje godišnjih troškova do 1,5 % u odnosu na slučaj s premazom faktora apsorpcije $a_s = 0,4$.

LITERATURA

- [1] Andrassy, M., Balen, I., Boras, I., Dović, D., Hrs Borković, Ž., Lenić, K., Lončar, D., Pavković, B., Soldo, V., Sučić, B., Švaić, S., Priručnik za energetska certificiranje zgrada, UNDP, Zagreb, 2010.
- [2] Direktiva o energetske učinkovitosti zgrada (2010/31/EU)
- [3] http://www.fzoeu.hr/hr/energetska_ucinkovitost/enu_u_zgradarstvu/
- [4] Pravilnik o energetske pregledu zgrade i energetske certificiranju (NN 48/2014)
- [5] Pravilnik o uvjetima i mjerilima za osobe koje provode energetske preglede građevina i energetske certificiranje zgrada (NN 81/2012)
- [6] Soldo, V., Novak, S., Horvat, I., Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [7] Galović, A., Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [8] Andrassy, M., Boras, I., Švaić, S., Osnove termografije - s primjenom, KIGEN, Zagreb, 2008.
- [9] Slipčević, B., Razmenjivači toplote - sa primerima iz rashladne tehnike, SMEITS, Beograd 2009.
- [10] Twidell, J., Weir, T., Renewable Energy Resources, Routledge, London, 1986.
- [11] Boras, I., Halasz, B., Galović, A., Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [12] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinske zaštiti u zgradama (NN 97/2014)
- [13] Dović, D., Ferdelji, N., Horvat, I., Rodić, A., Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] Dović, D., Horvat, I., Rodić, A., Soldo, V., Švaić, S., Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama: Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [15] Katalog proizvođača Daikin (UKEPLEN13-938), 2013.

[16] <http://strujaplin.com/energetsko-trziste/cijene-plina-m3>

[17] <http://strujaplin.com/energetsko-trziste/cijene-struje>

PRILOZI

I. CD-R disc